

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Sportovní tenisová hala z materiálů na bázi dřeva
Tennis sports hall made of wood – based materials

Student:

Bc. Tomáš Blahuta

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Blahuta**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb
Téma: **Sportovní tenisová hala z materiálů na bázi dřeva
Tennis sport hall made of wooden – based materials**
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce vypracujte:

1. Vypracujte stručnou rešerši nosných systémů sportovních hal z materiálů na bázi dřeva.
2. Navrhněte dispoziční řešení sportovní tenisové haly s dřevěnou nosnou konstrukcí. Výkresy (půdorys, řezy, pohledy, detaily) zpracujte ve vhodném měřítku.
3. Navrhněte tři varianty nosného systému haly z materiálů na bázi dřeva.
4. Pro zvolenou optimální variantu zpracujte návrh a posouzení vybraných rozhodujících nosných prvků a spojů, včetně ztužení haly a možného způsobu založení.
5. Posuďte požární odolnost rozhodujících nosných prvků.
6. Navrhněte způsob montáže nosného systému haly.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) ČSN EN 1995-1-1: Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- 2) ČSN EN 1995-1-2: Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-2: Navrhování konstrukcí na účinky požáru.
- 3) Blass, H. J. a kol.: Dřevěné konstrukce podle EUROKÓDU 5. STEP 1. Navrhování a konstrukční materiály. Vydal Koželouh, B. – KODR Zlín, 1998.
- 4) Blass, H. J. a kol.: Dřevěné konstrukce podle EUROKÓDU 5. STEP 2. Navrhování detailů a nosných systémů. Vydal Informační centrum ČKAIT, 2004.
- 5) Natterer, J. O. et al., Holzbau Atlas, Birkhauser – Verlag für Architektur, 2003, Basel, Schweiz, ISBN 3-7643-6984-1
- 6) Příručka 1 a 2, <http://fast10.vsb.cz/temtis/cz>, 2008.
- 7) Dřevostavby a dřevěné konstrukce I. a II. díl, CERM Akademické nakladatelství Brno, 2010.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.**

Datum zadání: 29.02.2016

Datum odevzdání: 30.11.2016



doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 30.11.2016

.....

Tomáš Blahuta

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace

BLAHUTA, Tomáš. *Sportovní tenisová hala z materiálů na bázi dřeva*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 148 s. Vedoucí práce doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.

Práce se zabývá nosným systémem zastřešení tenisové haly z materiálů na bázi dřeva. Zpracovány jsou tři návrhy konstrukce, pro vybranou optimální je proveden statický výpočet. Pro globální analýzu konstrukce je využit program Scia Engineer. Součástí práce je analýza a uskutečnění experimentu netradičního lepeného spoje dřevěných konstrukcí. Použitým lepidlem je dvousložkový epoxid s komerčním názvem Xepox 40. Součástí je přiložená výkresová dokumentace zvolené varianty.

Klíčová slova

Dřevěné konstrukce, hala, návrh, posouzení, statický výpočet, válcová klenba, skořepina, prutová konstrukce, Xepox, lepený spoj, tuhost.

Annotation

The thesis looks into supporting structure of tennis hall roofing made of wood-based materials. A three variations of supporting structure are processed, for the chosen optimal variation a structural calculation is carried out. Software Scia Engineering is used for global analysis of structure. A part of the thesis deals with experiment and analysis of non-traditional adhesive joint in timber structures. The adhesive used for joint is two-component epoxy sold under the Xepox 40 commercial name. Drawing documentation is included as a supplement to the thesis.

Key words

Timber structures, wood, hall, design, assesment, structural engineering, structural report, cylindrical vault, shell, beam structure, Xepox, adhesive joint, stiffness.

Obsah

Seznam použitého značení.....	10
Úvod	13
1 Rešerše nosných systémů sportovních hal z materiálů na bázi dřeva	14
1.1 Atletická hala – Vítkovice aréna v Ostravě	14
1.2 Zastřešení zimního stadionu Ludvíka Koška v Turnově	16
1.3 Dřevěná hala J. Lawrence Walkup Skydome v Arizoně	18
2 Dispoziční řešení.....	21
2.1 Lokalita stavby	21
2.2 Konstrukční rozdělení objektu	21
3 Globální aspekty haly společné pro všechny varianty	23
3.1 Obecné údaje.....	23
3.2 Součinitelé k_{mod} a k_{def}	23
3.3 Materiály konstrukce	24
3.4 Stanovení tuhosti podpor	24
3.4.1 Rozdělení na jednotlivé části.....	25
3.4.2 Jihozápadní strana - rám.....	26
3.4.3 Severozápadní strana - stěna	27
3.4.4 Severovýchodní strana – stěna se sloupy	28
3.4.5 Jihovýchodní strana - nosník	28
3.4.6 Shrnutí výsledků	29
3.5 Zatížení	30
3.5.1 Zatížení stálá.....	30
3.5.2 Zatížení užitná	30
3.5.3 Zatížení sněhem	30
3.5.4 Zatížení větrem	32
3.5.5 Kombinace zatížení.....	37
4 Varianta I.....	39
4.1 Popis konstrukce	39
4.2 Prostorový model konstrukce a výpočet.....	39
4.3 Zatížení konstrukce	40
4.4 Návrh a posouzení hlavních nosných prvků varianty na mezní stav únosnosti.....	42
4.4.1 Horní pás příhradového nosníku.....	43

4.4.2	Spodní pás příhradového nosníku.....	46
4.4.3	Diagonály příhradového nosníku.....	48
4.4.4	Sloupy podpírající boční přístavek	51
4.4.5	Shrnutí.....	54
4.5	Posouzení mezního stavu použitelnosti	54
5	Varianta II	56
5.1	Popis konstrukce	56
5.2	Prostorový model konstrukce a výpočet.....	57
5.3	Zatížení konstrukce	58
5.4	Návrh a posouzení hlavních nosných prvků varianty na mezní stav únosnosti.....	59
5.4.1	Hlavní nosníky.....	59
5.4.2	Krajní ukloněné oblouky	64
5.4.3	Sloupy podpírající boční přístavek	66
5.4.4	Vaznice.....	69
5.4.5	Shrnutí.....	72
5.5	Posouzení mezního stavu použitelnosti	72
6	Varianta III – realizovaná konstrukce	73
6.1	Popis konstrukce	74
6.2	Tuhost hlavního styčnicku.....	74
6.3	Prostorový model konstrukce a výpočet.....	76
6.4	Zatížení konstrukce	76
6.5	Návrh a posouzení hlavních nosných prvků varianty na mezní stav únosnosti.....	77
6.5.1	Diagonály trojúhelníkových segmentů	78
6.5.2	Průběžné prvky trojúhelníkových segmentů	82
6.5.3	Krajní obloukové nosníky	86
6.5.4	Sloupy podpírající boční přístavek	90
6.5.5	Příčné vodorovné prvky nadstavby.....	94
6.5.6	Vzpěry podpírající konstrukci nadstavby.....	98
6.5.7	Shrnutí.....	100
6.6	Posouzení mezního stavu použitelnosti	101
7	Srovnání variant a volba optimální	102
7.1	Spotřeba dřeva.....	102
7.2	Volný prostor pod zastřešením	103
7.3	Výběr optimální varianty	104

8	Konstrukce zvolené varianty.....	105
8.1	Posouzení mezního stavu únosnosti.....	105
8.2	Posouzení mezního stavu použitelnosti.....	105
8.3	Diagonály trojúhelníkových segmentů.....	106
8.4	Průběžné prvky trojúhelníkových segmentů.....	106
8.5	Krajní obloukové nosníky.....	107
8.6	Příčné vodorovné prvky nadstavby	108
8.7	Globální přetvoření konstrukce.....	108
8.8	Posouzení spojů v konstrukci.....	109
8.8.1	Styčnick spojující diagonály s průběžnými prvky trojúhelníkových segmentů.....	110
8.8.2	Posouzení montážního spoje průběžných prvků	114
8.8.3	Posouzení spojů konstrukcí nadstavby a přístavku	117
8.9	Posouzení požární odolnosti vybraných nosných prvků	119
8.9.1	Postup posouzení	119
8.9.2	Průběžné vaznice trojúhelníkových segmentů	120
8.9.3	Sloupy bočních stěn	123
8.10	Návrh způsobu montáže	126
9	Alternativní lepený spoj	128
9.1	Popis zkušebních vzorků	128
9.1.1	Spoj s krajními ocelovými plechy (vzorky A)	128
9.1.2	Spoj se středovým ocelovým plechem (vzorky B)	129
9.2	Postup přípravy vzorků.....	130
9.3	Výpočet únosnosti vzorků	132
9.4	Zatěžování vzorků.....	135
9.4.1	Výsledky	135
9.5	Vyhodnocení výsledků zkoušek.....	137
9.5.1	Vzorek se středovými ocelovými plechy	137
9.5.2	Vzorek s krajními ocelovými plechy	137
9.6	Rotační tuhost spoje	137
9.7	Aplikace řešeného spoje v navrhované konstrukci	138
	Závěr	140
	Seznam obrázků	145

Seznam použitého značení

A	plocha
C_e	součinitel expozice
C_t	tepelný součinitel
E	Youngův modul pružnosti
$E_{0,mean}$	průměrný modul pružnosti rovnoběžně s vlákny
$E_{90,mean}$	průměrný modul pružnosti kolmo k vláknům
F	síla obecně
G	modul pružnosti ve smyku
G_{mean}	průměrný modul pružnosti ve smyku
I_y	moment setrvačnosti k ose y
I_z	moment setrvačnosti k ose z
K_{ser}	modul prokluzu pro MSP
K_u	modul prokluzu pro MSÚ
M	moment – ohybový, statický
N	normálová síla
S	statický moment
T	torzní vnitřní síla
V	posouvací síla
W	průřezový modul
W_t	průřezový modul v kroucení
b	šířka obecně
$c_0(z)$	součinitel ortografie
c_{dir}	součinitel směru větru
$c_e(z)$	součinitel expozice
c_{pe}	vnější tlak
c_{pi}	vnitřní tlak
$c_r(z)$	součinitel drsnosti terénu
c_{season}	součinitel ročního období
d	šířka budovy
d_l	efektivní průměr spojovacího prostředku
e	excentricita

f	vzepětí klenby
f_c	pevnost dřeva v tlaku
f_m	pevnost dřeva v ohybu
f_t	pevnost dřeva v tahu
f_v	pevnost dřeva ve smyku
f_y	mez kluzu oceli
f_y	mez pevnosti oceli
h	výška obecně
i_y	poloměr setrvačnosti k ose y
i_z	poloměr setrvačnosti k ose z
k_c	součinitel vzpěrnosti
k_{cr}	součinitel vlivu výsušných trhlin
k_{def}	deformační součinitel
k_h	srovnávací součinitel pro tah a ohyb
k_m	součinitel redistribuce napětí a vlivu nehomogenit
k_{mod}	modifikační součinitel
k_{shape}	součinitel tvaru průřezu pro kroucení
l_{eff}	efektivní délka
l_s	půdorysná délka části střechy
n_{fi}	redukční součinitel
p	obvod redukovaného průřezu
$q_p(z)$	maximální dynamický tlak
r	rameno síly
s_k	charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi
u_{fin}	konečná deformace
u_{inst}	okamžitá deformace
$v_{b,0}$	výchozí základní rychlost větru
$v_m(z)$	střední rychlost větru
w	průhyb
w_k	charakteristický tlak větru
x	osa
y	osa
z	osa
ν	poissonovo číslo

τ	tangenciální napětí
α	úhel obecně
z_0	parametr drsnosti terénu
Δ	deformace obecně
β_c	součinitel splňující meze zakřivení
γ	bezpečnostní součinitel
λ	štíhlost průřezu
λ_{rel}	relativní štíhlost průřezu
ρ_k	charakteristická hodnota hustoty dřeva
ρ_{mean}	střední hodnota hustoty dřeva
σ	normálové napětí
σ_v	směrodatná odchylka turbulence
ψ	kombinační součinitelé

Úvod

Jedním ze základních požadavků na stavby je jejich bezpečnost. U nosných konstrukcí je vyžadováno posouzení schopnosti přenášet účinky zatížení bez vzniku poruch a vad. Posouzení konstrukce je prokazováno statickým výpočtem.

Hlavním cílem práce je hospodárný návrh a posouzení několika variant nosné střešní konstrukce sportovní tenisové haly z materiálů na bázi dřeva. Všechny varianty mají obdobný tvar střešní plochy. Jednou z variant je konstrukce již realizované stavby v Košicích. Projektantem a dodavatelem dřevěných konstrukcí zastřešení dané stavby je firma Taros-Nova s.r.o., která poskytla osově schéma nosných prvků pro zpracování posouzení.

Dalším záměrem práce je analýza alternativního spoje pro realizovanou konstrukci. Zkoumaný spoj se skládá z dřevěného prvku se zářezem, do kterého je vlepen ocelový plech s otvory. Pro lepidlo ve spoji je použit dvousložkový epoxid s komerčním názvem Xepox, poskytnutý rovněž firmou Taros-Nova s.r.o.

Základní 3D modely nosných systémů jsou vypracovány v softwaru AutoCAD 2012. Globální analýza konstrukce je provedena v programu Scia Engineer 15.2. Pro dimenzování prvků je využito předem připravených algoritmů v tabulkovém procesoru Microsoft Excel.

1 Rešerše nosných systémů sportovních hal z materiálů na bázi dřeva

Dřevo je jeden ze základních stavebních materiálů používaných po tisíce let a i dnes je používáno v hojně míře. Díky své jednoduché recyklovatelnosti s příznivým vlivem na životní prostředí je jedním z cenných dlouhodobě udržitelných zdrojů.

Dle literatury [6] začali s výstavbou prvních halových systémů na malé rozpětí již ve starověku Sumerové, Akkadové, Egypťané a Řekové. Významný vývoj v oblasti hal dřevěných konstrukcí lze zaznamenat na přelomu 18. a 19. století s rozmachem rovinných soustav (např. de l'Ormeho, Ardantových, Stephanových a Meltzerových). Na začátku 20. století byly budovány první prostorové dřevěné konstrukce [17].

Mimo nynějšího rozmachu ve stavbách pro bydlení je dřevo využíváno i pro nosné systémy halových objektů. Nejčastějším případem zastřešení sportovních hal je v současné době použití rovinných rámu či vazníků výhodných svou jednoduchostí návrhu a provedení. Pro své vhodné statické působení, estetiku, dispoziční řešení a jiné přednosti nejsou výjimkou ani prostorové konstrukce. Tato práce dále nastiňuje příklady zhotovených sportovních hal z materiálů na bázi dřeva.

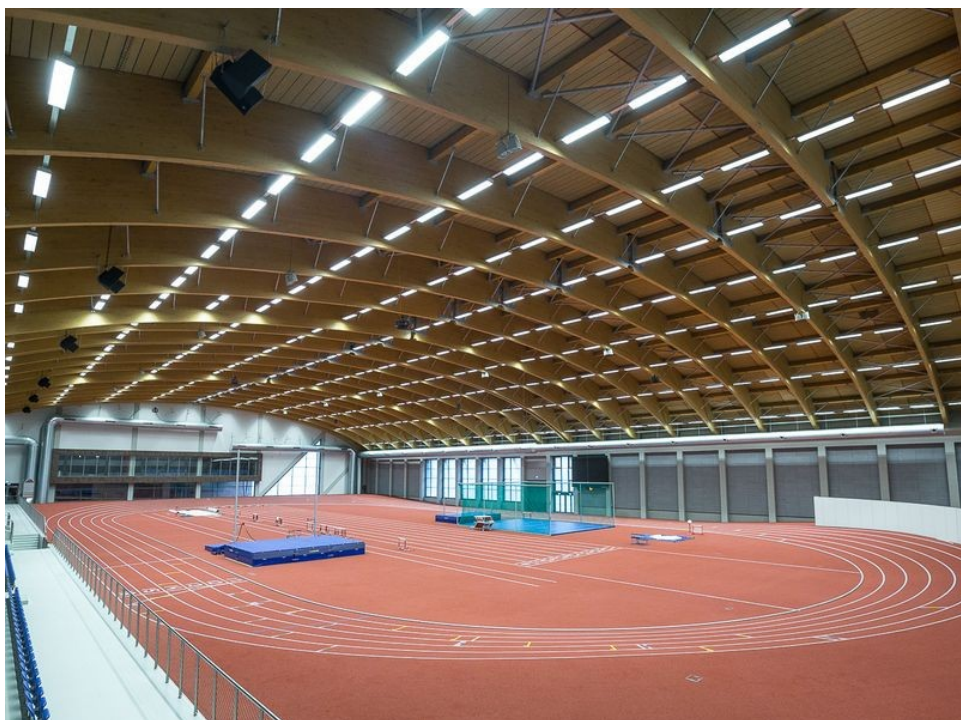
1.1 Atletická hala – Vítkovice aréna v Ostravě

Základní údaje [15]:

- Investor: Vítkovice Aréna a.s.
- Generální projektant: OSA Projekt s.r.o.
- Dodavatel části zastřešení: Taros – Nova s.r.o.
- Celkové náklady: 337 mil. Kč.
- Termín ukončení realizace: 11/2015
- Použité materiály: GL24h, GL28h, S355

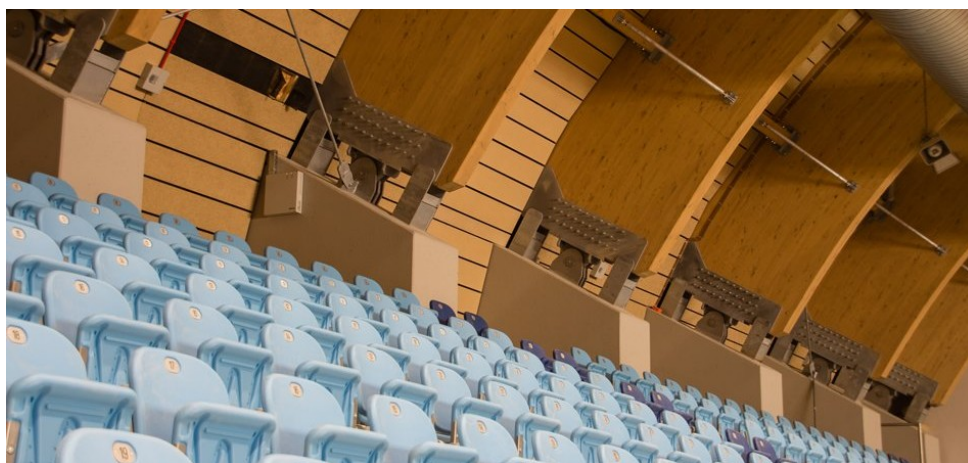
V Ostravě byla v roce 2015 vybudována atletická hala splňující kritéria Mezinárodní asociace atletických federací. Hala je obdélníkového půdorysu o rozměrech cca. 93 x 62 m. Střešní plocha má příčný řez blízký se tvaru elipsy.

Hlavní prvky jsou tvořeny plnostěnnými trojkloubovými vazníky z lepeného lamelového dřeva, s výškou průřezu 2400 mm. Statické působení konstrukce bylo podrobně analyzováno s využitím konstrukčních a geometrických nelinearit, tuhostí podpor a vnitřních kloubů.



Obr. 1: Atletická hala v Ostravě – pohled na střešní konstrukci [19].

Vodorovné síly od zakřivených vazníků jsou přenášeny do základů ocelovými trubkami v exteriéru. Tuhost konstrukce je v podélném směru zajištěna ocelovými vzpěry. Hlavní vazníky jsou zajištěny proti ztrátě stability oboustranně ocelovými vzpěrami. Klouby hlavních nosníků jsou tvořeny čepy s jistícím prvkem u okraje dřevěného trámu, který slouží k zajištění rotační tuhosti kloubu při velkých deformacích.



Obr. 2: Atletická hala v Ostravě – detail kotvení vazníků [5].



Obr. 3: Ocelové vzpěry kruhového průřezu, zachytávající vodorovné síly zastřešení [5].

1.2 Zastřešení zimního stadionu Ludvíka Koška v Turnově

Základní údaje [16]:

- Investor: Městská sportovní Turnov s.r.o.
- Generální projektant: BFB Studio s.r.o.
- Generální dodavatel stavby: sdružení stavebních firem BAK + Syner
- Celkové náklady: 175 mil. Kč.
- Termín ukončení realizace: 10/2015

Architektonickým záměrem zastřešení stadionu je tvar střechy připomínající list. Stadion je součástí sportovního rekreačního areálu Maškova zahrada v Turnově. Celkové vnější rozměry objektu jsou cca. 95 x 48 m.

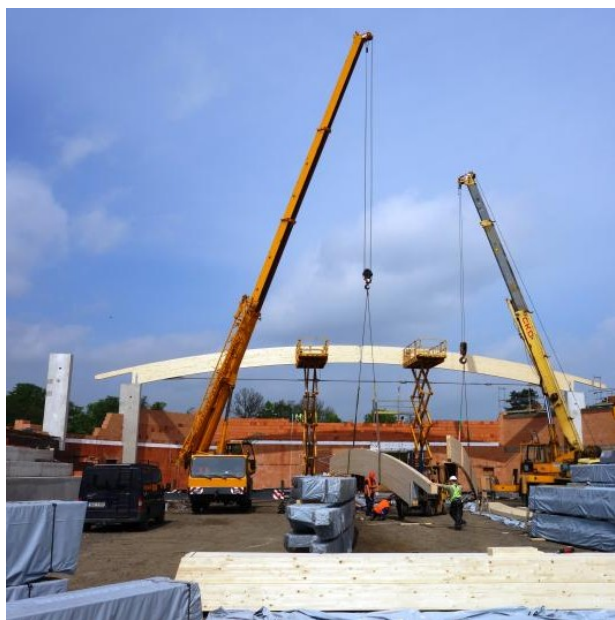


Obr. 4: Vizualizace zimního stadionu v Turnově [25].

Nosná konstrukce zastřešení je složena z dvanácti velkorozponových plnostěnných vazníků z lepeného lamelového dřeva. Zatížení ze střešního pláště je svedeno přes vaznice do hlavních nosných vazníků. Vazníky mají totožné zakřivení kruhového oblouku, liší se však jejich půdorysná délka. Uložení jednotlivých vazníků je v různých výškách tak, aby celkový tvar vzniknuvší plochy připomínal tvar listu.



Obr. 5: Střešní vazník [26].



Obr. 6: Osazování prvního vazníku [26].

Rozpětí konstrukce je v nejdelším příčném řezu cca 47 m. Dřevěné vazníky mají ocelové táhla zachycující vodorovné síly. Vazníky jsou ukládány na železobetonové sloupy. Příčná a podélná tuhost objektu je zajištěna železobetonovými sloupy se stěnami.



Obr. 7: Pohled na střešní nosníky z interiéru [23].

1.3 Dřevěná hala J. Lawrence Walkup Skydome v Arizoně

Základní údaje [28]:

- Investor: Northern Arizona University
- Generální projektant: Rossman and Partners
- Statické řešení: John K. Parsons
- Celkové náklady: cca 768 mil. Kč.
- Termín ukončení realizace: 10/1977

Stavba slouží jako víceúčelový stadion a se svou kapacitou přes 11 000 sedadel se jedná o největší sportovní halu v oblasti. Objekt je tvaru kopule s kruhovým půdorysem. Od svého zhotovení držela stavba po šest let přední příčku v rozpětí dřevěných hal: kopule má průměr 153 m. Výška kopule je 43 m.



Obr. 8: Stadion Walkup Skydome v Arizoně [24].

Stadion dostal své jméno po J Lawrence Walkup, prezidentem Northern Arizona Univerzity, který se ve své době zapřičinil o její rozmach. Hala stojí v nadmořské výšce 2100 m. n. m. Pro stavbu bylo použito borovicové dřevo. Stavba byla navrhována dle norem Spojených států amerických platných v roce 1975, později prošla rekonstrukcí v roce 2011.



Obr. 9: Zastřešení stadionu [24].

Konstrukční systém je založen na trojúhelníkových rovnostranných segmentech s nosníky, které mají stejný směr v jedné z 6 kruhových výsečí. Nosníky přenášejí zatížení pláště na hlavní nosné prvky. Trojúhelníkové segmenty jsou seskládány do tvaru geodetické kopule. První rotačně symetrická úroveň má trojúhelníky rovnoramenné s větší výškou trojúhelníků. Na vrcholu kopule je umístěn šestiúhelníkový prstenec, s tužším diafragmatem na svém obvodu. Nad středovým prstencem je vytvořen kruhový světlík. Prostorovou tuhost zajišťuje geometrické uspořádání prvků, nebylo tedy potřeba navrhovat zavětrování ztužidly.



Obr. 10: Portál dřevěné haly [24].



Obr. 11: Výstavba haly Walkup Skydome [24].



Obr. 12: Výstavba haly Walkup Skydome [24].

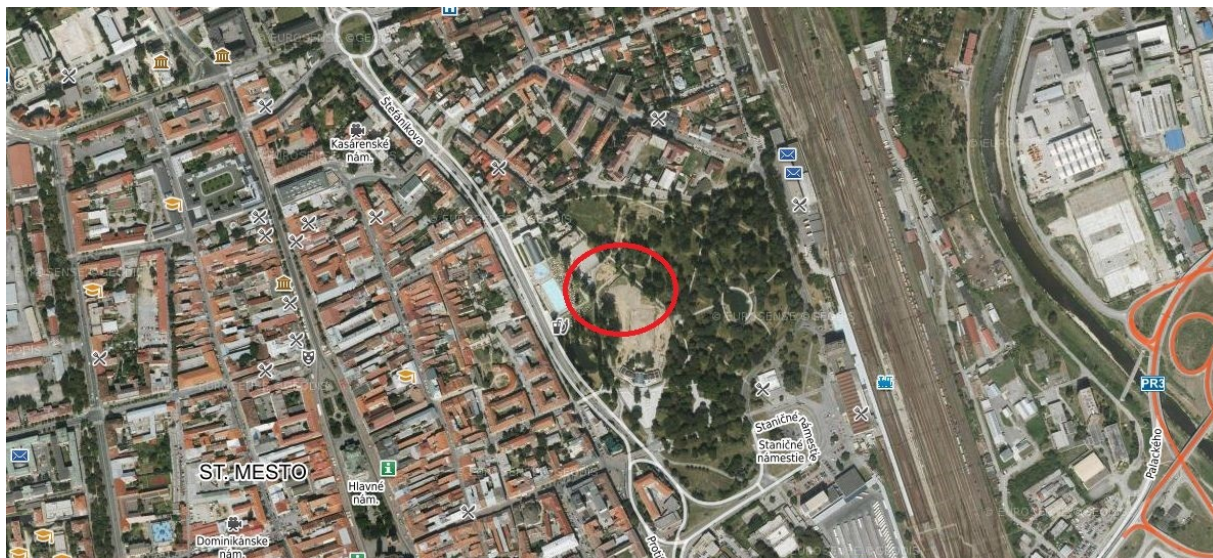
2 Dispoziční řešení

Předmětem zájmu této práce je nepodsklepený, jednopodlažní objekt sportovní haly se zakřivenou plochou střechy. Hala je součástí tenisového areálu s 8 kurty. K areálu náleží budovy se zázemím, podzemní parkoviště, zatravněné plochy, venkovní tenisové kurty a navrhovaná hala zastřešující dva vnitřní tenisové kurty. Objekt bude sloužit veřejnosti pro sportovní využití.

2.1 Lokalita stavby

Navrhovaná hala je situována na území Slovenské republiky ve městě Košice. Lokalita pro stavbu je v těsné blízkosti městského parku, veřejného koupaliště, železniční stanice a historického centra města.

Hala je umístěna v nadmořské výšce 220 m. n. m. v údolí řeky Hornád. Parcela se nachází v záplavovém území Q100 [22]. Okolní terén je převážně nezvlněný, stavba sousedí s městskou zástavbou a porostem parku. Objekt je částečně zapuštěný do terénu, stavba tedy není dominantní svému okolí, vnější povrch je navíc navržen jako zelená střecha.



Obr. 13: Umístění tenisové haly v Košicích.

2.2 Konstrukční rozdělení objektu

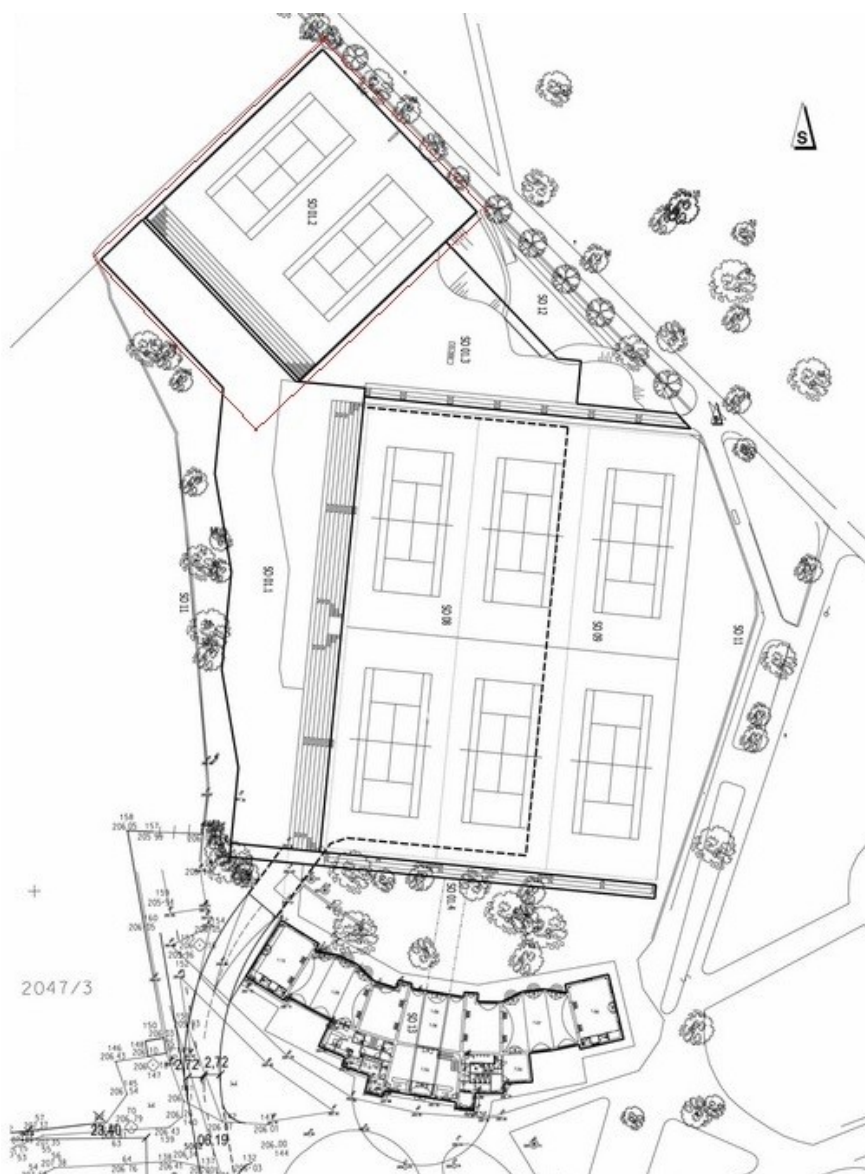
Sportovní hala zastřešuje dva tenisové kurty s tribunou. Sportovní zázemí (šatny, sprchy, WC, administrativa apod.) jsou situovány v přiléhající dvoupatrové budově. Hlavní vstup do objektu je situován z jihu.

Přilehlá budova je zhotovena z monolitického železobetonu a tvoří společně s dřevěným zastřešením jeden celek. Dřevěná konstrukce zastřešení je kotvena

do železobetonové monolitické spodní stavby, která je zapuštěna pod úroveň terénu. Monolitická konstrukce spodní stavby je obdélníkového tvaru o rozměrech přibližně 36,9 x 36,5 m a je tvořena stěnami s výztužnými sloupy, spojitým nosníkem a samotnou betonovou budovou.

Střecha je osazena na železobetonovou budovu (ve dvou výškových úrovních) na jiho-západní straně. Na severo-západní straně a severo-východní straně je konstrukce uložena na železobetonové stěny a na jiho-západní straně je zastřešení kotveno na spojitý železobetonový nosník.

Dřevěná konstrukce střechy má ve všech variantách střešní plášť blížíci se tvaru válcové klenby. Rozpětí střešního oblouku je **36,95 m**. Hala má délku 36,49 m.



Obr. 14: Situace tenisového areálu [20].

Výkresová dokumentace řešené varianty je přiložena k diplomové práci jako příloha.

3 Globální aspekty haly společné pro všechny varianty

V rámci diplomové práce je zpracováno několik návrhů nosné konstrukce haly. Všechny tyto varianty mají společné geometrické uspořádání vnějších vazeb, tuhostní charakteristiky vnějších vazeb, materiál nosné konstrukce, lokalitu stavby a tudíž i klimatické zatížení.

3.1 Obecné údaje

Ve výpočtech je uvažováno s bezpečnostními a kombinačními součiniteli dle normy [1]. Pro každou řešenou variantu je vytvořen 3D prostorový prutový model. Globální analýza konstrukce je provedena softwarem Scia Engineer [21], pracujícím na základě metody konečných prvků. V rámci konstrukčního modelu je uvažováno s pružnými podporami. Ve výpočtu byly zahrnuty **geometrické nelinearity** (teorie dle 2. řádu) a lokální nelinearity určitých prutů. Při posuzování prvků bylo využito srovnávacích součinitelů k_h pro ohyb a tah.

3.2 Součinitelé k_{mod} a k_{def}

Dle normy [4] je nutno pro dřevěné nosné prvky určit součinitele k_{mod} a k_{def} , zohledňující vlhkostní poměry a délku trvání zatížení.

Dřevěná hala je na celém svém povrchu ve všech variantách pokryta hydroizolační vrstvou, žádný prvek nosné konstrukce není vystaven vnějšímu prostředí. Při uvážení účelu konstrukce není předpokládána vlhkost při povrchu nosných prvků vyšší než 65%. Je tedy uvažována třída provozu 1.

Hala je zatížená klimatickým krátkodobým zatížením, střednědobým užitným zatížením a zatížením stálým. Všechny vnitřní síly jsou stanoveny z kombinace obsahující zatížení větrem, čemuž odpovídá součinitel k_{mod} pro krátkodobé trvání zatížení.

Výsledné součinitele k_{mod} a k_{def} pro lepené lamelové dřevo, dle výše uvedené třídy trvání zatížení a třídu provozu 1 jsou:

$$k_{mod} = 0,77 [-]$$

$$k_{def} = 0,60 [-]$$

3.3 Materiály konstrukce

Pro všechny navrhované varianty je uvažováno lepeného lamelového dřeva třídy GL24h. Materiálové charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 1:

Vlastnosti dřeva:					
Pevnostní vlastnosti:	$f_{m,k}$	24	[MPa]	$f_{m,d}$	15,56 [MPa]
	$f_{t,0,k}$	16,5	[MPa]	$f_{t,0,d}$	11,18 [MPa]
	$f_{t,90,k}$	0,5	[MPa]	$f_{t,90,d}$	0,31 [MPa]
	$f_{c,0,k}$	24	[MPa]	$f_{c,0,d}$	14,78 [MPa]
	$f_{c,90,k}$	2,7	[MPa]	$f_{c,90,d}$	1,66 [MPa]
	$f_{v,k}$	3,5	[MPa]	$f_{v,d}$	2,16 [MPa]
Tuhostní vlastnosti:	$E_{0,mean}$	11,6	[kN/mm ²]	$E_{0,d}$	9,28 [kN/mm ²]
	$E_{0,05}$	8,8	[kN/mm ²]	$E_{0,05,d}$	7,04 [kN/mm ²]
	$E_{90,mean}$	0,39	[kN/mm ²]	$E_{90,d}$	0,31 [kN/mm ²]
	G_{mean}	0,72	[kN/mm ²]	G_d	0,58 [kN/mm ²]
Hustota:	ρ_k	380	[kg/m ³]		
	ρ_{mean}	420	[kg/m ³]		

Tabulka 1: Materiálové charakteristiky dřeva GL24h.

Použitá ocel pro prvky spojů je třídy S355J2 dle ČSN EN 10025. Vybrané charakteristiky navržené oceli jsou uvedeny v tabulce 2:

mez kluzu $f_y =$	355	[MPa]
mez pevnosti $f_u =$	510	[MPa]
modul pružnosti $E =$	210000	[MPa]
poissonův souč. $\nu =$	0,3	[-]
smyk. modul pružnosti $G =$	80769,2	[MPa]

Tabulka 2: Vybrané materiálové charakteristiky oceli S355.

3.4 Stanovení tuhosti podpor

Statický model by měl vystihovat reálné chování konstrukce. Vnitřní síly specifické pro daný model jsou mimo jiné ovlivněny tuhostmi vnějších vazeb. Při změně tuhostních poměrů u podpor se napětíové namáhání v konstrukci redistribuje. Plně pevné či dokonale kloubové podpory nemusí odpovídat reálnému působení, je tedy výhodnější určit hodnotu tuhostí vnějších vazeb.

Pro každou stranu obdélníkové monolitické konstrukce je sestaven dílčí stěnový (příp. prutový) model. Do bodů určených pro kotvení dřevěné konstrukce jsou jednotlivě vloženy síly s jednotkovou velikostí.

Pro výpočet tuhostí v podporách byly použity dílčí 3D MKP modely tvořené prutovými prvky, představujícími sloupy a 2D prvky, znázorňujícími stropní desky. Vytvořené modely byly postupně zatěžovány jednotkovou silou v místech podpor, vyhodnocována byla deformace v zatěžovaném místě. Tuhost vnější vazby k_{supp} je stanovena dle vzorce:

$$k_{supp} = \frac{F}{\Delta}, \quad (1)$$

kde F je jednotková síla a Δ naměřená deformace.

3.4.1 Rozdělení na jednotlivé části

Dřevěná nosná konstrukce je kloubově podepřena po délce svého půdorysného obvodu (obr 15). Každá strana obdélníkového půdorysu je podepírána jiným druhem betonové konstrukce. Pro odhad tuhostí byla zvolena třída betonu C 30/37.



Obr. 15: Pohled na konstrukci s viditelnou spodní stavbou tvořící podpory zastřešení.

Jihozápadní strana je s pravidelnou roztečí kotvena do budovy, tvořené betonovým rámem vysokým 6 m. Strana severozápadní a severovýchodní je tvořena podpůrnou obvodovou stěnou, zapuštěnou do okolního terénu, přičemž severovýchodní stěna je

vyztužena přídruženými sloupy. Podpory jihovýchodní strany tvoří spojitý nosník o osmi polích.

3.4.2 Jihozápadní strana - rám

Tuhost na jihozápadní straně udává přídružená železobetonová budova, tvořící rám o dvou podlažích (obr. 16 a 17). Výška prvního patra je stanovena na 2,6 m, výška druhého patra je 3,5 m.

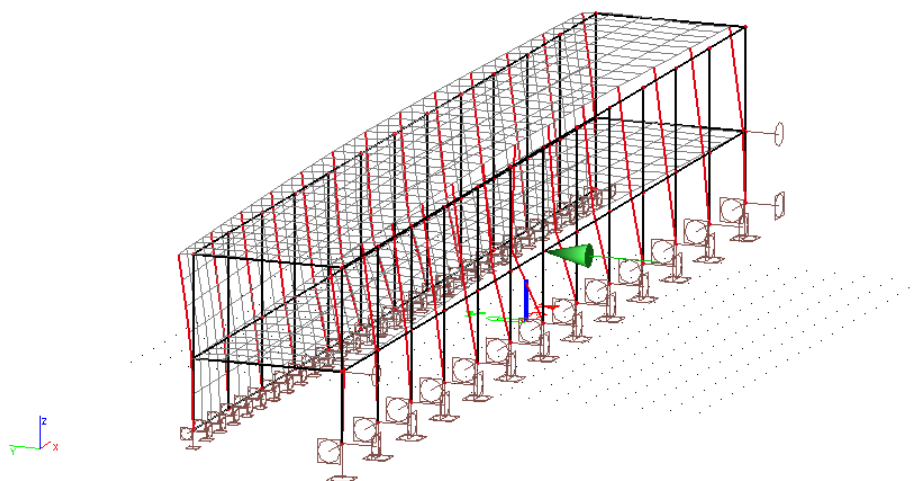


Obr. 16: Přilehlá budova.



Obr. 17: Pohled na zastřešení s přilehlou budovou.

Na betonovém rámu se nacházejí dvě řady podpor. U horního patra narůstá výsledná tuhost směrem ke středu budovy, zjištěné hodnoty jsou 200 MN/m u krajní podpory a 460 MN/m u střední podpory. Spodní část budovy je přídružená ke kolmým obvodovým konstrukcím, tuhosti jednotlivých podpor jsou tedy přibližně stejné po celé délce spodního patra. Vypočtená tuhost podpor na spodním patře je 1500 MN/m.



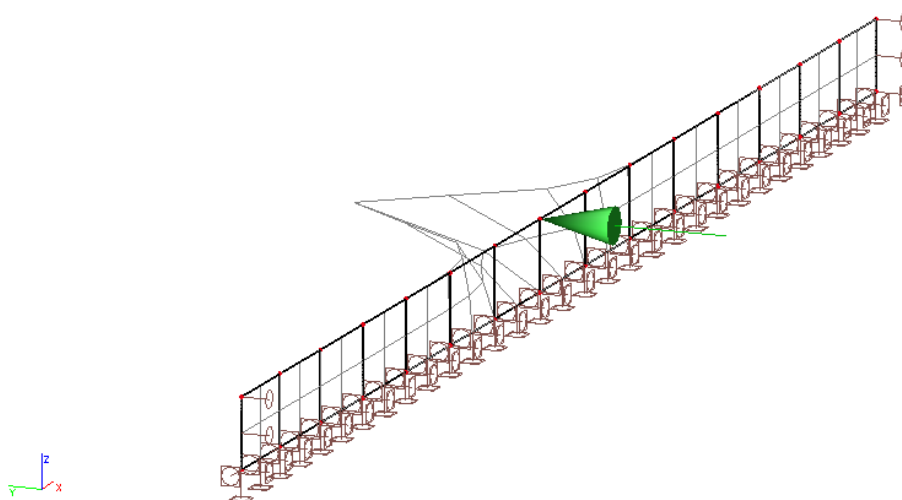
Obr. 18: Model konstrukce ŽB monolitické budovy.

3.4.3 Severozápadní strana - stěna

Pro severozápadní stranu konstrukce bylo předpokládáno podepření průběžnou spojitou stěnou o tloušťce 300 mm. Výška stěny je uvažovaná 1,5 m, tuhost je tedy dostatečná i bez dalšího vyztužení sloupy, pomocí stěnového modelu byla stanovena hodnota 240 MN/m.



Obr. 19: Stěna tvořící podpory pro dřevěnou konstrukci.



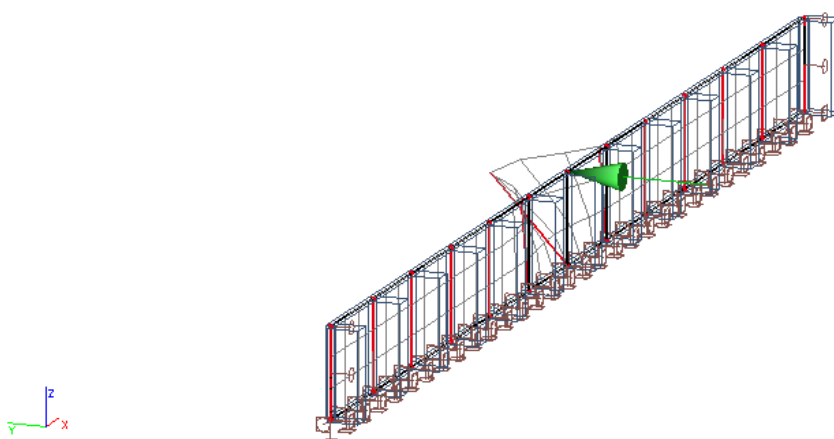
Obr. 20: Stěna namodelovaná pro určení vodorovné tuhosti podpory.

3.4.4 Severovýchodní strana – stěna se sloupy

Tuhost zajišťuje vetknutá stěna vyztužená podpůrnými monolitickými sloupy. Sloupy jsou umístěny pod každým připojením dřevěné konstrukce. Délka konzolové části stěn a sloupů je stanovena na 2600 mm. Tloušťka stěny je předpokládána 300 mm. Rozměry přidružených sloupů jsou zvoleny 950 x 700 mm. Výsledná hodnota tuhosti je pomocí stěnového modelu vypočtena na 430 MN/m.



Obr. 21: Stěna se sloupy odolávajícími značným vodorovným silám.



Obr. 22: Stěna se sloupy, stanovení vodorovné tuhosti na modelu.

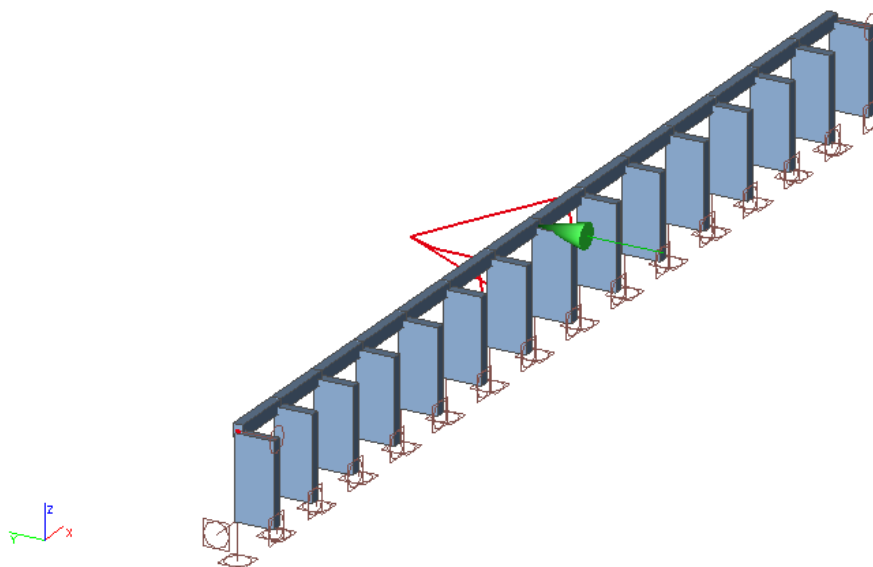
3.4.5 Jihovýchodní strana - nosník

Pro výpočet tuhostí vazeb na jihovýchodní straně objektu (obr. 23) byl sestaven model skládající se z nosníku a sloupů. Nosník funguje staticky jako spojitý, zatěžován je

nad podporami a uprostřed rozpětí polí. Zjištěná tuhost po MKP analýze je 256 MN/m nad podporou a 150 MN/m v poli. Díky ukotvení nosníku do přiléhajících betonových konstrukcí na jeho koncích, je tuhost (pro soustavu pole – podpora) přibližně stejná na celé délce nosníku.



Obr. 23: Spojitý nosník podpíraný nesymetricky umístěnými sloupy.



Obr. 24: Model spojitého nosníku pro určení tuhostí vazeb.

3.4.6 Shrnutí výsledků

Pro každou část konstrukce spodní stavby je sestaven model, který stanovuje deformaci bodů vnějších vazeb na základě zatížení jednotkovým zatížením. Se znalostí

deformace ve vyšetřovaném bodě je tuhost vnější vazby stanovena dle vzorce (1). Výsledné tuhosti podpor na jednotlivých stranách objektu jsou:

Jihozápadní strana (rám):	1500 [MN/m] pro spodní patro, 200 až 460 [MN/m] pro horní patro.
Severozápadní strana (stěna):	240 [MN/m].
Severovýchodní strana (stěna se sloupy):	430 [MN/m].
Jihovýchodní strana (nosník):	256 [MN/m] (nad podporou), 150 [MN/m] (v poli).

3.5 Zatížení

Pro všechny varianty návrhu nosného systému bylo použito ekvivalentních hodnot zatížení. Na konstrukci jsou aplikována zatížení stálá, užitná a klimatická (zatížení sněhem a větrem). Klimatická zatížení jsou stanovena pro oblast Košic, použity jsou však české národní přílohy.

3.5.1 Zatížení stálá

Na konstrukci je navržena zelená střecha. Hodnoty stálých zatížení byly dodány generálním projektantem a zároveň zhotovitelem realizované stavby, firmou Taros - Nova s.r.o. Pro stálé zatížení je střešní plocha rozdělena na dvě části. Středová oblast je v horní části zastřešení a zabírá prostor mezi body ležícími ve čtvrtinové vzdálenosti rozpětí, půdorysně tedy zabírá polovinu průmětu střešní plochy. Zbývající oblast je okrajová, zahrnuje plochu vytyčenou podporami a čtvrtinou rozpětí. Zatížení má velikost $1,3 \text{ kN/m}^2$ ve středové oblasti a $1,6 \text{ kN/m}^2$ v okrajové oblasti. Tyto hodnoty jsou ekvivalentně převedeny do všech variant návrhu.

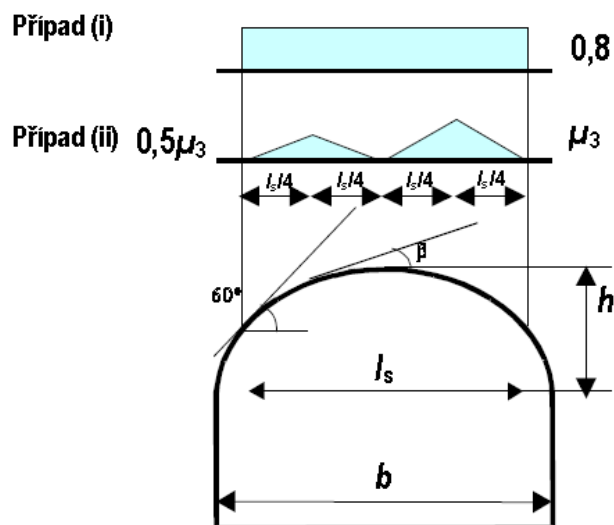
3.5.2 Zatížení užitná

Na střeše je uvažováno užitné zatížení kategorie H – nepochůzí střechy. Hodnota tohoto zatížení je $0,75 \text{ kN/m}^2$. Zatížení se ovšem nekombinuje se zatížením sněhem. Jelikož je hodnota zatížení sněhem pro danou lokalitu a typ konstrukce větší, není s užitným zatížením dále počítáno.

3.5.3 Zatížení sněhem

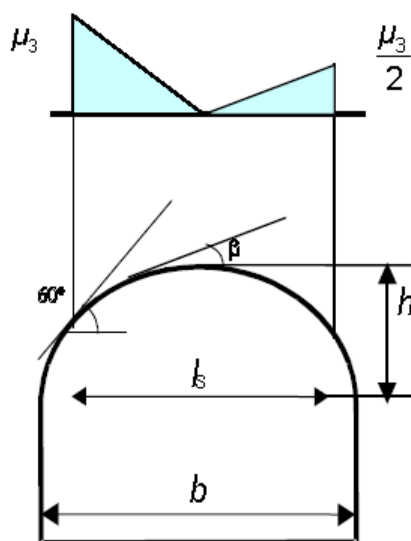
Zatížení je určeno v souladu s [2]. Střecha je válcového tvaru, rozpětí b je necelých 37 m, vzepětí h 6 m a půdorysná délka části střechy se sklonem menším než 60° l_s je

37 m (střecha nepřesahuje sklon 60° v celé své délce). Dle eurokódu jsou uvažovány dva zatěžovací stavy – zatížení nenavátým sněhem a zatížení navátým sněhem (obr. 25).



Obr. 25: Tvarové součinitele zatížení sněhem pro válcovou střechu.

Česká národní příloha navíc udává třetí zatěžovací stav dle obr. 26:



Obr. 26: Tvarový součinitel pro válcové střechy dle české národní přílohy.

Zatížení sněhem na střechu bylo stanoveno dle následujících vztahů a hodnot:

char. hodnota zatížení na zemi	$s_k =$	0,95	[kN/m ²]	(Košice)
sněhová oblast		1	[-]	
souč. expozice	$C_e =$	1,0	[-]	
tepelný souč.	$C_t =$	1,0	[-]	
vzepětí	$h =$	6	[m]	
šířka / rozpětí	$b =$	37	[m]	
délka sklonu pod 60°	$l_s =$	37	[m]	

Tvarový součinitel pro zatížení dle eurokódu je vypočten z rovnice platné pro úhel $\beta \leq 60^\circ$:

$$\mu_3 = 0,2 + \frac{10h}{b}, \quad (2)$$

a pro zatížení dle české národní přílohy je lineárně interpolována tabulka 3:

h/b	1/8	1/6	$\geq 1/5$
μ_3	1,45	1,8	2,0

Tabulka 3: Hodnoty tvarového součinitele μ_3 dle české národní přílohy.

Výsledné hodnoty tvarových součinitelů jsou tedy:

$$\begin{aligned} \text{tvarový souč.} \quad \mu_3 &= 1,82 \quad [-] \\ \text{tvarový souč. NA Česká} \quad \mu_3 &= 1,76 \quad [-] \end{aligned}$$

Výsledné charakteristické hodnoty zatížení jsou vypočteny dle rovnice (3):

$$s_k = s_k \cdot C_e \cdot C_t \cdot \mu_i, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{zatížení sněhem} \quad s_1 &= 0,76 \quad [\text{kN/m}^2] \\ \text{zatížení sněhem} \quad s_3 &= 1,73 \quad [\text{kN/m}^2] \\ \text{zatížení sněhem NA Česká} \quad s_3 &= 1,67 \quad [\text{kN/m}^2] \end{aligned}$$

Sníh převíslý přes okraj střechy se neuplatní, neboť oblast pro Košice neodpovídá (v závislosti na char. hodnotě zatížení na zemi) české oblasti 5 nebo vyšší. Zatížení ze střech sousedících a přiléhajících k okolním stavbám se neuplatní, nenacházejí se výše než válcová plocha.

3.5.4 Zatížení větrem

Zatížení je stanoveno dle ČSN EN 1991-1-4. Kritický je pro vyčíslení zatížení větrem charakteristický maximální dynamický tlak $q_p(z)$. Ten zahrnuje střední rychlost větru a turbulentní složku větru. Faktory ovlivňující maximální dynamický tlak jsou povětrnostní podmínky a místní vlivy. Dále jsou stručně uvedeny hlavní postupy pro výpočet vlivu větru na stavební konstrukci.

Vnější rozměry budovy jsou:

$$\begin{aligned} \text{výška budovy} \quad h &= 8,5 \quad [\text{m}] \quad (\text{nejvyšší bod střešní plochy}) \\ \text{délka budovy} \quad b &= 36,9 \quad [\text{m}] \\ \text{šířka budovy} \quad d &= 36,5 \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

Vstupními údaji pro výpočet zatížení větrem jsou mj. povětrnostní podmínky. Výchozí základní rychlost větru je určena pro oblast Košic. Základní charakteristiky povětrnostních podmínek jsou:

výchozí zákl. rychl. větru	$v_{b,0} =$	26,0	[m/s]
součinitel směru větru	$c_{dir} =$	1,0	[-]
souč. ročního období	$c_{season} =$	1,0	[-]
součinitel ortografie	$c_0(z) =$	1,0	[-]
kategorie terénu		2	[-].

Základní rychlost větru lze určit na základě rovnice (4):

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}. \quad (4)$$

Střední rychlost větru je určena rovnicí (5):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b. \quad (5)$$

kde $c_r(z)$ je součinitel drsnosti terénu a $c_0(z)$ vyjadřuje součinitel ortografie. Po dopočítání součinitelů je možno přistoupit k výpočtu charakteristického maximálního dynamického tlaku dle vztahu (6):

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b, \quad (6)$$

kde $c_e(z)$ je součinitel expozice a q_b základní tlak větru.

Při uvážení výše uvedených vztahů a charakteristik konstrukce, kterou se tato práce zabývá, jsou výsledné hodnoty pro určení zatížení větrem následující:

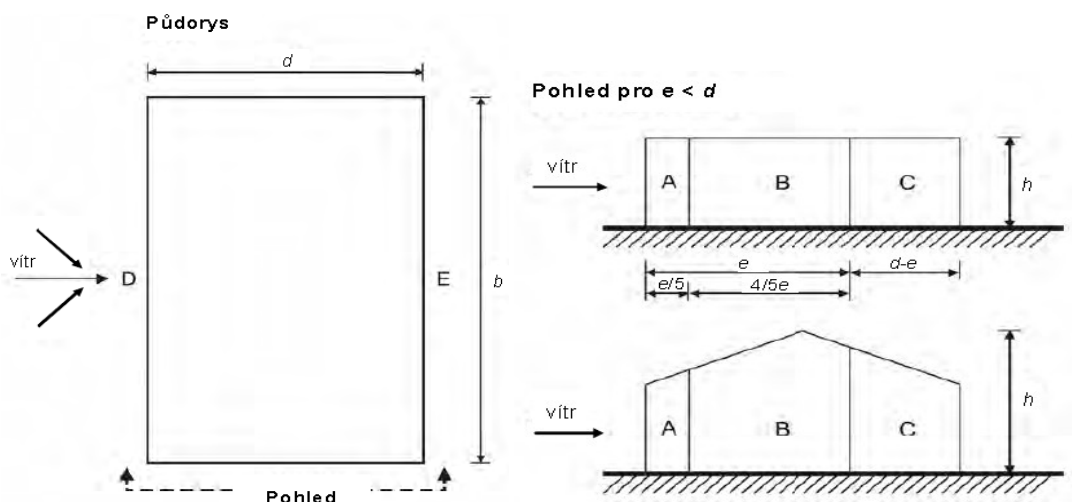
základní rychlost větru	$v_b =$	26	[m/s]
parametr drsnosti terénu	$z_0 =$	0,05	[-]
min. výška dle tab. 4.1	$z_{min} =$	2	[-]
	$z_{0,II} =$	0,05	[m]
souč. terénu	$k_r =$	0,190	[-]
souč. drsnosti terénu	$c_r(z) =$	0,976	[-]
střední rychlost větru	$v_m(z) =$	25,37	[m/s]
	$k_t =$	1,0	[-]
směrodat. odch. turbulence	$\sigma_v =$	4,94	[-]
intenzita turbulence	$I_v(z) =$	0,195	[-]
max. dyn. tlak větru	$q_p(z) =$	0,95	[kN/m ²]
souč. expozice	$c_e(z) =$	2,25	[-].

Tlaky větru jsou závislé na vnitřním tlaku budovy. Norma [2] povoluje vzít v úvahu hodnotu vnitřního tlaku c_{pi}^+ rovnou 0,20 a hodnotu c_{pi}^- rovnou -0,30. Výsledný tlak větru je vypočten dle vzorce (7):

$$w_k = q_p(z) \cdot (c_{p,e} - c_{p,i}), \quad (7)$$

3.5.4.1 Zatížení na stěny budovy

Pro uvažovanou výšku budovy je rozložení tlaku větru po výšce konstantní. Vítr je pro určení zatížení na stěny rozdělen na příčný a podélný. Rozložení jednotlivých oblastí s rozdílným tlakem na vnější plášť budovy je naznačeno na obrázku 27.



Obr. 27: Rozložení tlaků větru na stěny budovy.

Rozměry oblastí jsou vyjádřeny následujícími hodnoty:

$$\begin{aligned} e/5 &= 3,40 & [\text{m}] \\ 4/5e &= 13,60 & [\text{m}] \\ d - e &= 19,50 & [\text{m}] \text{ (pro příčný vítr)} \\ d - e &= 19,90 & [\text{m}] \text{ (pro podélný vítr).} \end{aligned}$$

Součinitele vnějších tlaků pro stěny c_{pe} jsou určeny na základě tabulky 4:

Oblast	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,20	-1,40	-0,80	-1,10	-0,50	-0,50	0,80	1,00	-0,70	-0,70
1	-1,20	-1,40	-0,80	-1,10	-0,50	-0,50	0,80	1,00	-0,50	-0,50
$\leq 0,25$	-1,20	-1,40	-0,80	-1,10	-0,50	-0,50	0,70	1,00	-0,30	-0,30

Tabulka 4: Součinitele vnějších tlaků c_{pe} pro stěny.

Interpolací tabulky lze získat součinitele vnějších tlaků c_{pe} pro stěny:

Součinitele vnějších tlaků - příčný vítr

plocha A =	313,65	[m ²]
h/d =	0,23	[-]
$c_{pe}^A =$	-1,20	[-]
$c_{pe}^B =$	-0,80	[-]
$c_{pe}^C =$	-0,50	[-]
$c_{pe}^D =$	0,70	[-]
$c_{pe}^E =$	-0,30	[-]

Dle rovnice (7) jsou spočteny vnější tlaky na stěny pro příčný a podélný vítr, horní indexy u označení tlaků odpovídají oblasti stěny. Výsledné tlaky příčného větru pro vnitřní přetlak ($c_{pi} = 0,2$) a podtlak ($c_{pi} = -0,3$) jsou:

Výsledné tlaky na plášť budovy - c_{pi}^+

$w^{A+} =$	-1,33	[kN/m ²]
$w^{B+} =$	-0,95	[kN/m ²]
$w^{C+} =$	-0,67	[kN/m ²]
$w^{D+} =$	0,48	[kN/m ²]
$w^{E+} =$	-0,48	[kN/m ²]

Výsledné tlaky na plášť budovy - c_{pi}^-

$w^{A+} =$	-0,86	[kN/m ²]
$w^{B+} =$	-0,48	[kN/m ²]
$w^{C+} =$	-0,19	[kN/m ²]
$w^{D+} =$	0,95	[kN/m ²]
$w^{E+} =$	0,00	[kN/m ²]

Výsledné tlaky podélného větru pro vnitřní přetlak ($c_{pi} = 0,2$) a podtlak ($c_{pi} = -0,3$) jsou:

Výsledné tlaky na plášť budovy - c_{pi}^+

$w^{A+} =$	-1,33	[kN/m ²]
$w^{B+} =$	-0,95	[kN/m ²]
$w^{C+} =$	-0,67	[kN/m ²]
$w^{D+} =$	0,48	[kN/m ²]
$w^{E+} =$	-0,48	[kN/m ²]

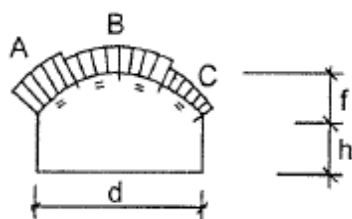
Výsledné tlaky na plášť budovy - c_{pi}^-

$w^{A+} =$	-0,86	[kN/m ²]
$w^{B+} =$	-0,48	[kN/m ²]
$w^{C+} =$	-0,19	[kN/m ²]
$w^{D+} =$	0,95	[kN/m ²]
$w^{E+} =$	0,00	[kN/m ²]

3.5.4.2 Zatížení na střechu budovy

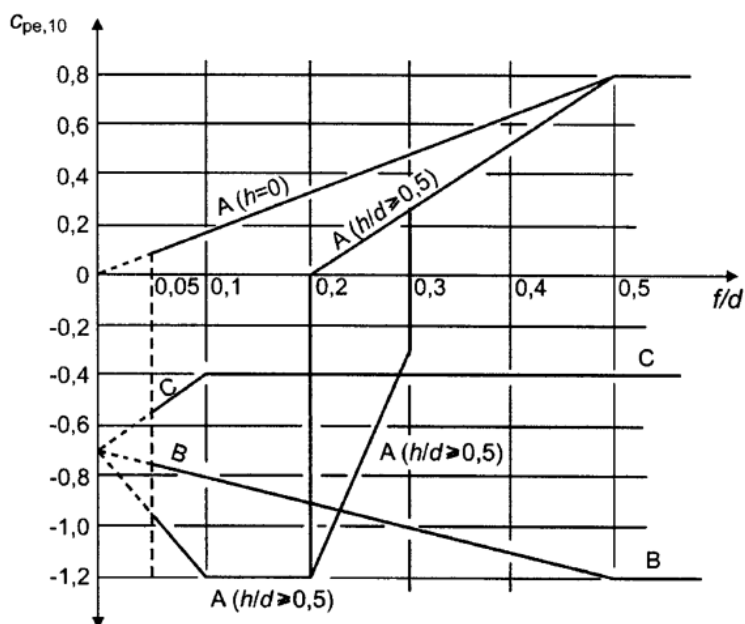
Potřebné rozměry objektu pro stanovení zatížení větrem jsou:

výška podezdívky	h =	2,5	[m]
vzepětí klenby	f =	6	[m]
rozpětí klenby	d =	36,9	[m]



Obr. 28: Popis rozměrů střechy a uspořádání zatížení větrem.

Dle kapitoly 7.2.8. se pro klenbové střechy s pravoúhlým půdorysem určí součinitelé tlaku $c_{pe,10}$ podle grafu (obr. 29).



Obr. 29: Součinitele $c_{pe,10}$ pro klenbové střechy.

Pro dané rozměry střechy lze součinitele $c_{pe,10}$ pro oblast A lineárně interpolovat ($h/d < 0,5$):

$$h/d = 0,068 \quad [-]$$

$$f/d = 0,163 \quad [-].$$

Hodnoty součinitelů $c_{pe,10}$ interpolované z grafu:

$$c_{pe}^{A1} = 0,300 \quad [-] \quad (\text{pro oblast A})$$

$$c_{pe}^B = -0,863 \quad [-] \quad (\text{pro oblast B})$$

$$c_{pe}^C = -0,400 \quad [-] \quad (\text{pro oblast C}).$$

Z výsledných součinitelů lze stanovit výsledné vnější tlaky. Pro vnitřní přetlak (c_{pi}^+) jsou výsledné tlaky větru na budovu:

$$w^{A1} = \mathbf{0,10} \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$w^B = \mathbf{-1,01} \quad [\text{kN/m}^2]$$

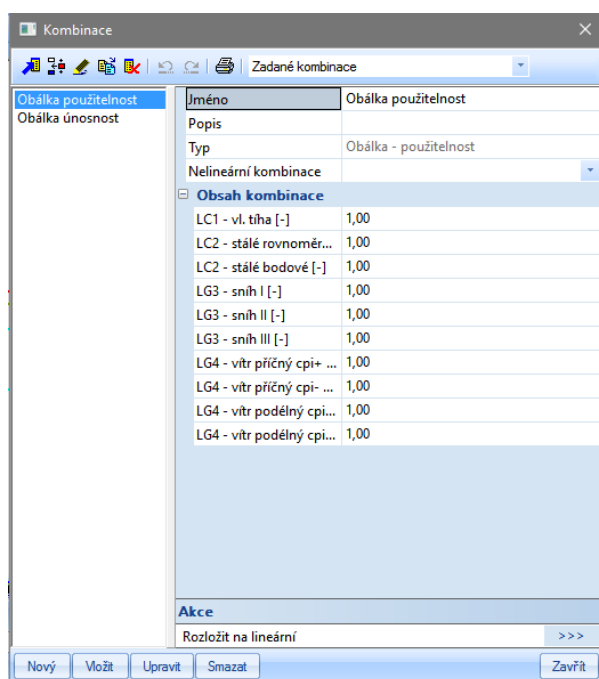
$$w^C = \mathbf{-0,57} \quad [\text{kN/m}^2],$$

pro vnitřní podtlak (c_{pi}) jsou výsledné tlaky větru na budovu:

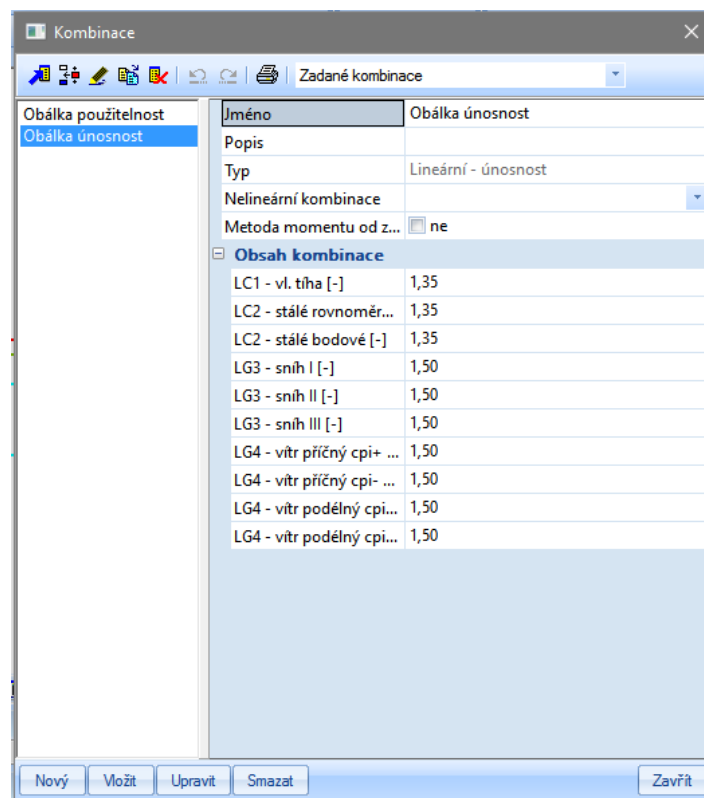
$$\begin{aligned} w^{A1} &= \mathbf{0,57} \quad [\text{kN/m}^2] \\ w^B &= \mathbf{-0,53} \quad [\text{kN/m}^2] \\ w^C &= \mathbf{-0,10} \quad [\text{kN/m}^2] \end{aligned}$$

3.5.5 Kombinace zatížení

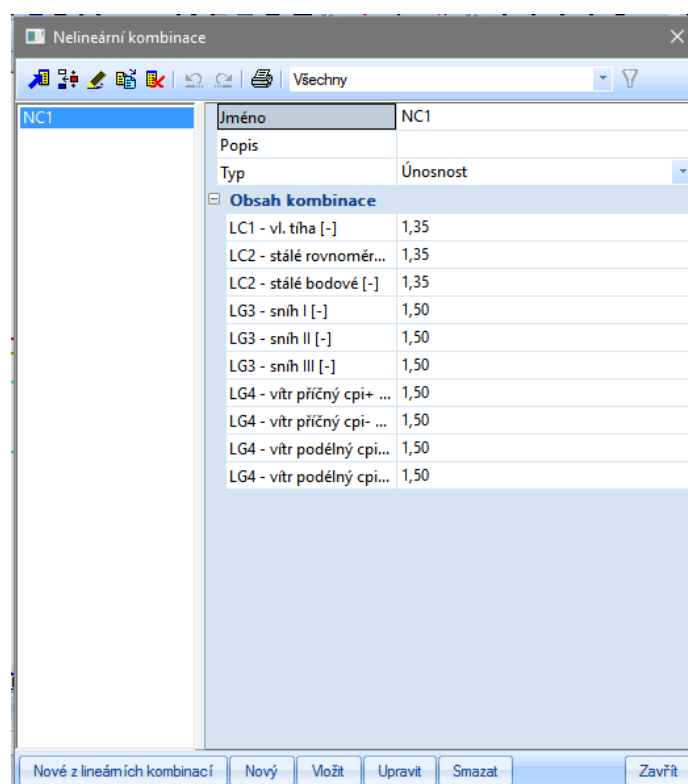
Na stavební konstrukci běžně nepůsobí jen jeden zatěžovací stav. Jedním z kroků statického výpočtu je proto sestavení kombinací jednotlivých zatěžovacích stavů. Stanovení kombinací zatížení popisuje norma [1]. Pro všechny varianty nosných systémů jsou sestaveny 3 totožné kombinace: návrhová kombinace pro první mezní stav dle vzorce 6.10a zmiňované normy, charakteristická kombinace pro druhý mezní stav dle vzorce 6.14b normy a kombinace potřebná k nelineárnímu výpočtu. Seznamy zatěžovacích stavů jednotlivých kombinací společně s bezpečnostními součiniteli jsou uvedeny na obr. 30, 31 a 32.



Obr. 30: Kombinace pro 2. mezní stav s charakteristickými hodnoty zatížení.



Obr. 31: Kombinace pro 1. mezní stav s návrhovými hodnoty zatížení.



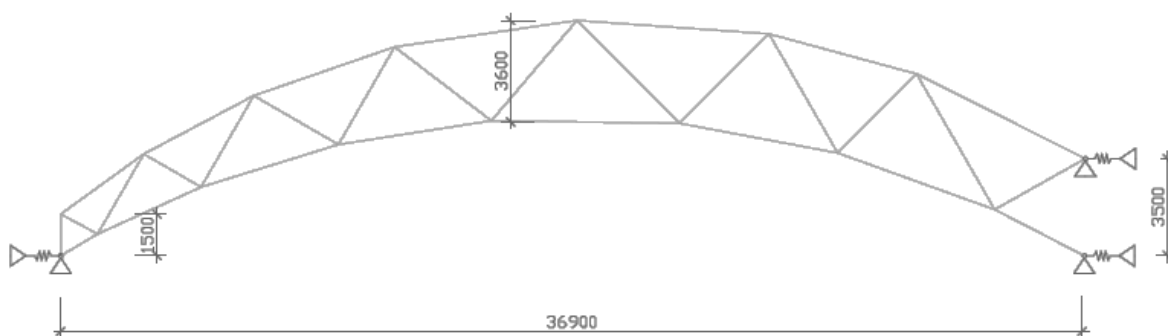
Obr. 32: Kombinace zatížení pro nelineární výpočty.

4 Varianta I

Jako první varianta je zpracován návrh dřevěné haly s nosnou konstrukcí skládající se z příhradových nosníků a vaznic.

4.1 Popis konstrukce

Hlavním nosným prvkem je příhradový nosník tvořený horním a dolním obloukovým pásem. Vzdálenost obloukových pásů (tzn. výška nosníku) se mění po délce nosíku. Největší vzdálenost mezi pásy, 3,6 m je přibližně uprostřed rozpětí. Obloukové pásy jsou navzájem spojeny diagonálami, ukončeny jsou navazující svislicí na jedné straně a kotvením do přiléhající budovy na straně druhé. Na sbíhavém konci obloukových pásů je výška nosníku 1,5 m, výška nosníku na konci kotveném na ŽB budovu je 4,5 m. Statické schéma příhradového nosníku lze shlédnout na obr. 33. Na čelních stranách objektu jsou navrženy přístavky s trojúhelníkovým příčným řezem.

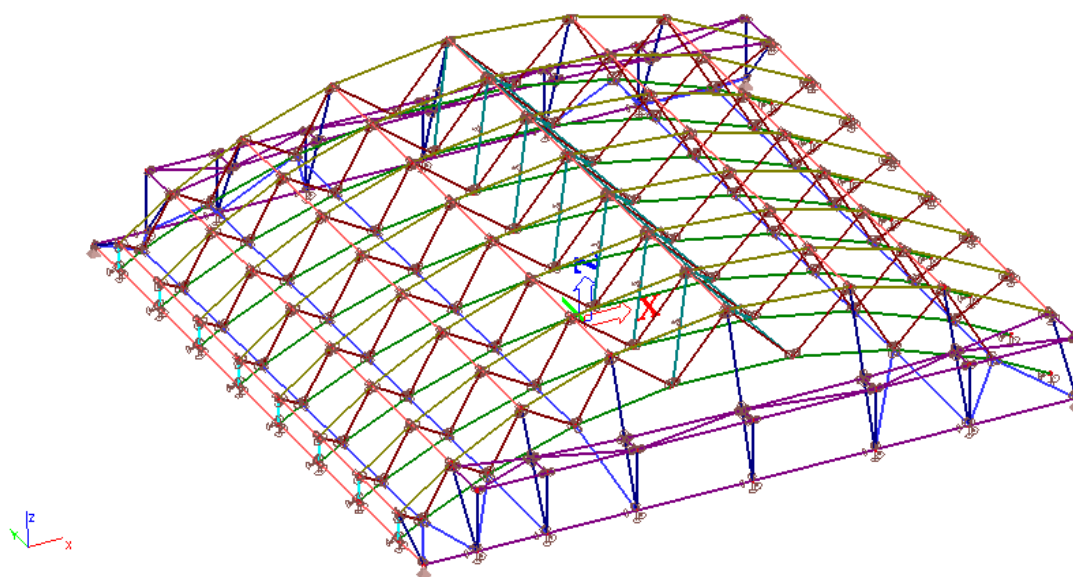


Obr. 33: Statické schéma příhradového nosníku.

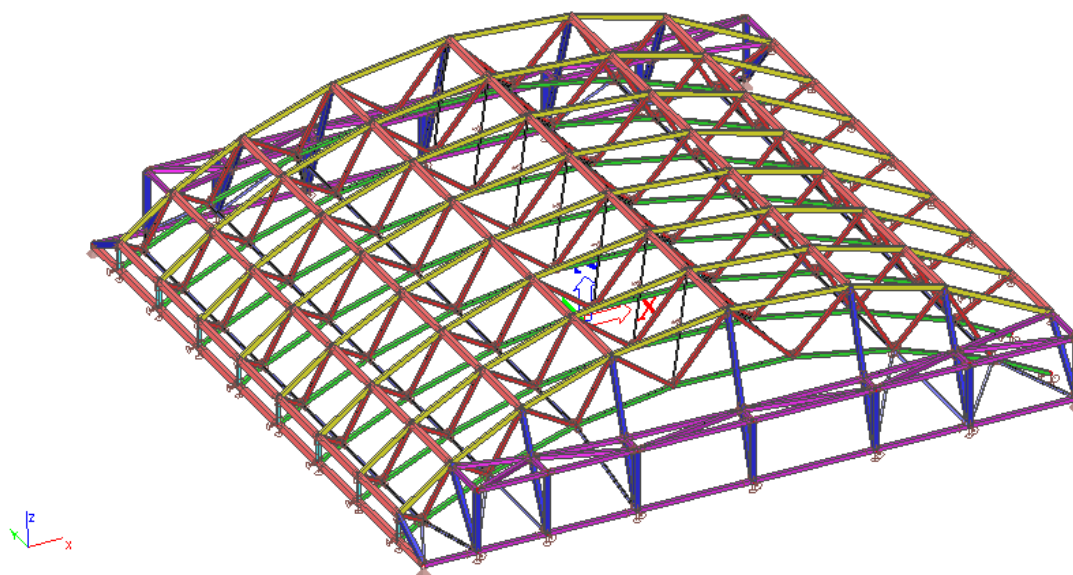
Zatížení je do příhradového nosníku vnášeno dominantně vaznicemi dlouhými 4,4 m (tento rozměr odpovídá také rozteči hlavních nosníků). Chování veškerých styčníků je uvažováno kloubové. Dřevěná hala je zavětrována ocelovými táhly umístěnými ve dvou šikmých rovinách přibližně uprostřed rozpětí.

4.2 Prostorový model konstrukce a výpočet

Pro výpočet byl vytvořen 3D model konstrukce obsahující prutové prvky. Vnější vazby jsou ve vodorovném směru uvažovány polotuhé, hodnoty tuhostí popisuje kapitola 3.4. Kombinace zatěžovacích stavů lze nalézt v kapitole 3.5.5. Model konstrukce je zobrazen na obrázku 34 a 35.



Obr. 34: Osové zobrazení modelu konstrukce.



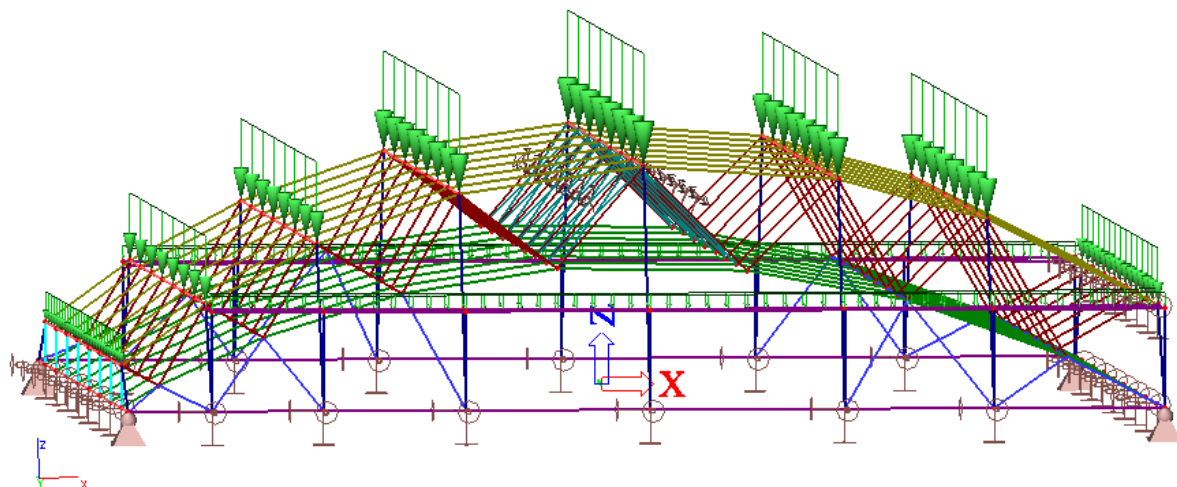
Obr. 35: Zobrazení modelu konstrukce s vykreslenými nosnými prvky.

Výpočet byl proveden s uvážením konstrukčních a geometrických nelinearit. Ocelové ztužidla (táhla) mají nadefinovanou vlastnost vyloučení tlaku. Řešení konstrukce metodou konečných prvků je tedy prováděno **iteračně**, s uvážením **geometrické matice tuhosti**.

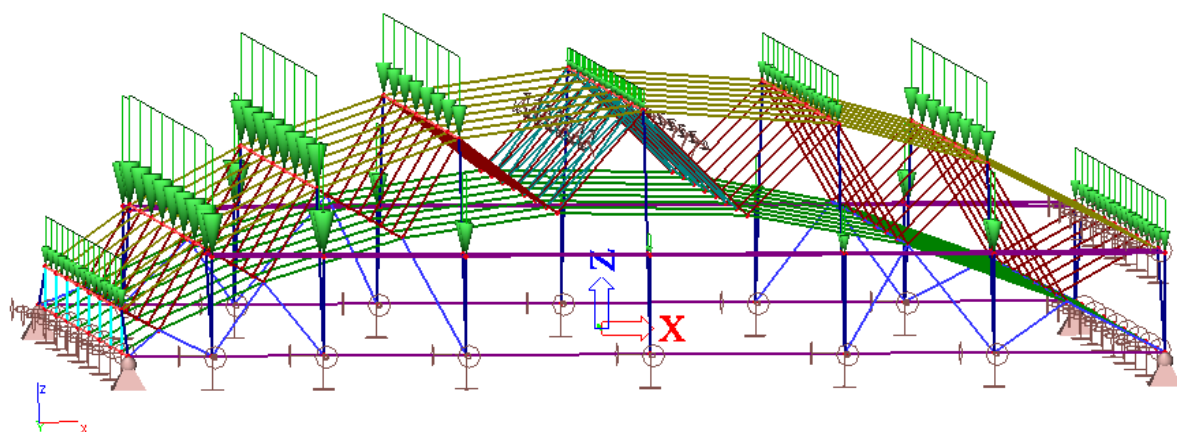
4.3 Zatížení konstrukce

Výpočet velikostí účinků stálých, užitných a klimatických zatížení je uveden v kapitole 3.5. Jednotlivé plošné zatížení z této kapitoly je vynášeno příslušnými zatěžovacími šířkami a aplikováno na model konstrukce v softwaru Scia Engineer [21]. Do modelu bylo

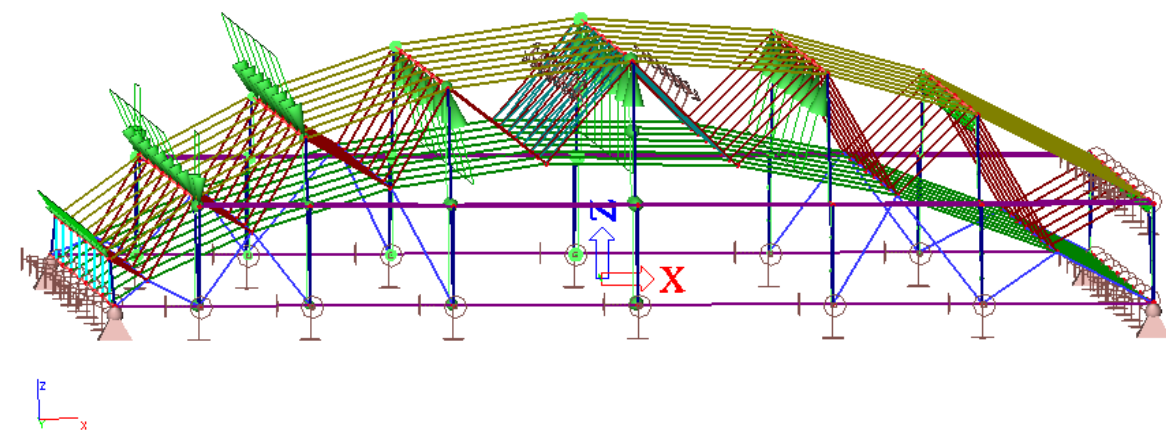
zatížení vkládáno na pruty jako bodové, rovnoměrně spojitě a nerovnoměrně spojitě. Vybrané zatěžovací stavy jsou zobrazeny na obrázcích 36, 37 a 38.



Obr. 36: Zatížení rovnoměrně rozloženým sněhem.



Obr. 37: Zatížení sněhem s uspořádáním dle české národní přílohy normy [2].



Obr. 38: Zatížení příčným větrem pro vnitřní tlak $c_{pi} = -0,3$.

4.4 Návrh a posouzení hlavních nosných prvků varianty na mezní stav únosnosti

Konstrukce je složena z rozdílných průřezů lepeného lamelového dřeva. Průřezy jsou rozděleny na horní pás příhrady, dolní pás příhrady, diagonály příhrady, svislici příhrady, vaznice, vodorovné a svislé prvky bočních přístavků a konstrukční vzpěradla dolního pásu příhradového nosníku. Vybrané průřezové charakteristiky lze stanovit na základě vzorců (8):

$$\begin{aligned}A &= b \cdot h, \\I_y &= \frac{1}{12} b \cdot h^3, \\I_z &= \frac{1}{12} h \cdot b^3, \\W_y &= \frac{1}{6} b \cdot h^2, \\W_z &= \frac{1}{6} h \cdot b^2, \\S_y &= \frac{1}{8} b \cdot h^2, \\S_z &= \frac{1}{8} h \cdot b^2, \\i_y &= \sqrt{\frac{I_y}{A}}, \\i_z &= \sqrt{\frac{I_z}{A}},\end{aligned}\tag{8}$$

Využití průřezů je stanoveno dle vzorce:

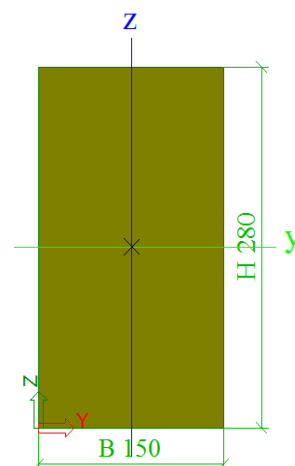
$$\vartheta = \frac{X_{E,d}}{X_{R,d}} \cdot 100 \text{ [%]},\tag{9}$$

kde $X_{E,d}$ je návrhový účinek zatížení a $X_{R,d}$ je návrhová odolnost konstrukce.

Vnitřní síly byly získány nelineární globální analýzou konstrukce.

4.4.1 Horní pás příhradového nosníku

Pro horní pás je zvolen průřez 150/280 mm. Prvky jsou součástí příhradového nosníku, nejdelší délkový rozměr průřezu je 6 m. Horní pás je v rovině kolmo na směr vláken zajištěn proti vybočení a klopení střešním pláštěm. V rovině rovnoběžné k ose z průřezu je vzpěrná délka 6 m. Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:



šířka průř. b:	150	[mm]
výška průř. h:	280	[mm]
plocha průř. A:	42000	[mm ²]
mom. setrvač. I _y :	2,7E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I _z :	7,9E+07	[mm ⁴]
modul průř. W _y :	1960000	[mm ³]
modul průř. W _z :	1050000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S _y :	1470000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S _z :	787500	[mm ³]
polom. setrvač. i _y :	80,8	[mm]
polom. setrvač. i _z :	43,3	[mm]

Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
B216	Horní pásnice - OBDEL	4,493	NC1	-337,77	0,09	-0,27	0,00	1,40	0,06
B243	Horní pásnice - OBDEL	6,953	NC1	40,12	0,00	-0,76	0,00	-1,12	0,15
B245	Horní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-21,46	-0,09	0,66	0,04	-0,90	0,06
B157	Horní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-200,09	0,10	0,59	0,00	0,38	-0,37
B217	Horní pásnice - OBDEL	3,701	NC1	-156,45	-0,03	-1,49	0,00	-2,42	-0,03
B246	Horní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-149,61	0,09	1,06	0,00	-0,92	-0,44
B183	Horní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-137,20	0,05	0,54	-0,03	-0,42	-0,11
B38	Horní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-26,86	-0,02	0,27	0,05	-0,41	0,08
B246	Horní pásnice - OBDEL	4,493	NC1	-150,06	0,09	0,22	0,00	1,94	-0,02
B245	Horní pásnice - OBDEL	5,379	NC1	-21,84	-0,09	-0,42	0,04	-0,26	-0,45
B185	Horní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-129,33	-0,02	0,79	0,03	-1,09	0,21

Posouzení na smyk

Návrhová smyková síla ve směru y a z:

$$V_{Ed,y}: 1,49 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{Ed,z}: 0,10 \quad [\text{kN}]$$

Posouzení je provedeno dle kapitoly 6.1.7 normy [4]. Pro splnění podmínky $\tau_d \leq f_{v,d}$ je postup posouzení následující:

$$\tau_{v,d,i} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{Ed,i}}{b_{eff,i} \cdot h},$$

$$\tau_{v,d} = \sqrt{\tau_{v,d,y}^2 + \tau_{v,d,z}^2},$$

$$\text{kde } b_{eff,i} = k_{cr} \cdot b,$$
(10)

a k_{cr} označuje součinitel vlivu výsušných trhlin.

Vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu:

šířka průřezu prvku y-y	b_y :	150	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	280	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	101	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	188	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,08	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,00	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	3,68	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	0,22	[%]	Vyhovuje

Posouzení na kombinaci vzpěru a ohybu

Návrhové síly pro posouzení vzpěru v kombinaci s ohybem:

N_{Ed} :	40,12	-337,90	-156,50	[kN]
$V_{Ed,y}$:	0,80	0,27	1,49	[kN]
$V_{Ed,z}$:	0,00	0,09	0,05	[kN]
$M_{Ed,y}$:	1,12	1,40	2,42	[kNm]
$M_{Ed,z}$:	0,15	0,06	0,03	[kNm]

Posouzení je provedeno dle kapitoly 6.3.2 normy [4]. Pro splnění podmínky únosnosti průřezu je postup stručně nastíněn:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}},$$

$$k_{c,i} = \frac{1}{k_i + \sqrt{k_i^2 + \lambda_{rel,i}^2}},$$

$$k_i = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,i} - 0,3) + \lambda_{rel,i}^2),$$

(11)

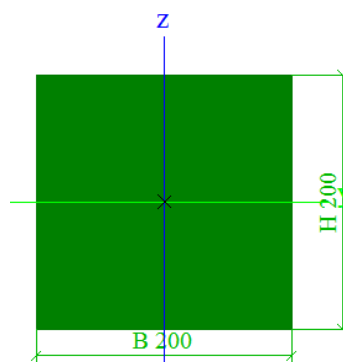
kde β_c označuje součinitel splňující meze zakřivení.

Vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu:

štíhlost k ose y	λ_y :	74,23	74,23	74,23	[-]
štíhlost k ose z	λ_z :	0,00	0,00	0,00	[-]
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	1,23	1,23	1,23	[-]
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	0,00	0,00	0,00	[-]
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	0,1	0,1	[-]
	k_y :	1,31	1,31	1,31	[-]
	k_z :	0,49	0,49	0,49	[-]
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,57	0,57	0,57	[-]
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	1,03	1,03	1,03	[-]
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,04	1,00	0,52	[-]
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,03	0,56	0,30	[-]
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	\mathcal{G} :	4,21	99,52	51,77	[%] Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	\mathcal{G} :	3,40	56,28	30,04	[%] Vyhovuje

4.4.2 Spodní pás příhradového nosníku

Pro spodní pás je zvolen průřez 220/220 mm. Prvky jsou součástí příhradového nosníku, nejdelší délkový rozměr průřezu je 6,8 m. Spodní pás je v rovině kolmo na směr vláken zajištěn proti vybočení a klopení konstrukčními vzpěrami a táhly. Největší vzpěrná délka pro vybočení ve vodorovné rovině je 6,8 m. V rovině rovnoběžné k ose z průřezu je vzpěrná délka rovněž max. 6,8 m. Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:



šířka průř. b:	220	[mm]
výška průř. h:	220	[mm]
plocha průř. A:	48400	[mm ²]
mom. setrvač. I _y :	2E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I _z :	2E+08	[mm ⁴]
modul průř. W _y :	1774667	[mm ³]
modul průř. W _z :	1774667	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S _y :	1331000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S _z :	1331000	[mm ³]
polom. setrvač. i _y :	63,5	[mm]
polom. setrvač. i _z :	63,5	[mm]

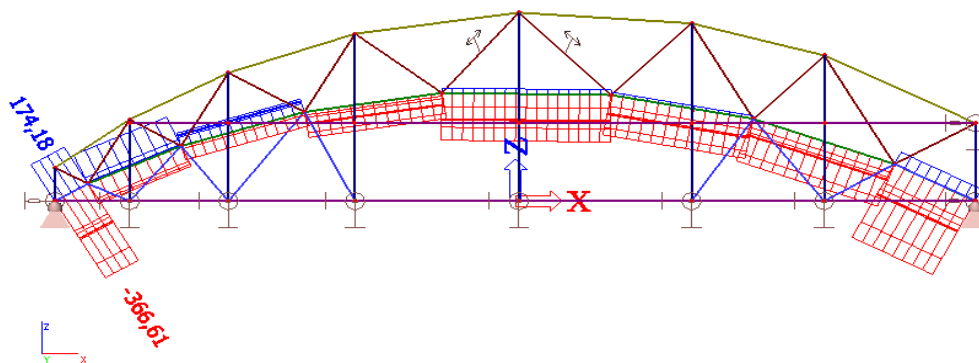
Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	V _y [kN]	V _z [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
B210	Spodní pásnice - OBDEL	1,545	NC1	-359,68	-0,20	-1,67	0,00	-1,71	0,00
B240	Spodní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	162,98	-0,27	0,27	0,00	0,13	0,43
B28	Spodní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-8,38	-0,53	0,54	0,15	-0,48	1,37
B205	Spodní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-146,13	0,36	0,51	-0,12	-0,34	-1,17
B238	Spodní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	30,44	-0,12	0,75	0,04	-0,88	0,01
B207	Spodní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-86,84	-0,53	0,72	0,16	-0,79	1,34
B209	Spodní pásnice - OBDEL	0,000	NC1	-80,01	0,09	-0,11	-0,03	1,07	-0,06
B28	Spodní pásnice - OBDEL	5,587	NC1	-8,55	-0,53	-0,57	0,15	-0,55	-1,61

Posouzení vzpěru

Pro daný prvek je dominantní namáhání osovou silou. Průběh vnitřních sil na spodním pásu je zobrazen na obr. 39.



Obr. 39: Průběh vnitřních sil spodního pásu příhradového nosníku.

Návrhové síly pro posouzení vzpěru společně s příslušnými vzpěrnými délkami:

Nmax Lb,z 1600	Nmax Lb,z 3650	Nmax Lb,z 6800	Nmax Lb,z 6800
N _{Ed} : -366,80	-324,80	-195,00	-146,00 [kN]

Posouzení je provedeno dle kapitoly 6.3.2 normy [4] pro všechny kombinace osové síly a vzpěrné délky. Uveden je průběh výpočtu k nejkritičtější kombinaci: osové síly $N_{Ed} = -195$ kN a vzpěrné délky 6,8 m. Posouzení je provedeno na základě vzorců (11). Vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu:

štíhlost k ose y	λ_y :	107,07	[-]
štíhlost k ose z	λ_z :	107,07	[-]
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	1,78	[-]
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	1,78	[-]
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	[-]
	k_y :	2,16	[-]
	k_z :	2,16	[-]
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,30	[-]
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	0,30	[-]

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,93 \quad [-]$$

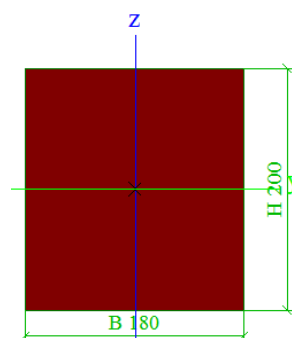
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,93 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) \mathcal{G} : **93,40** [%] **Vyhovuje**

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$) \mathcal{G} : **93,02** [%] **Vyhovuje**

4.4.3 Diagonály příhradového nosníku

Pro diagonály je zvolen průřez 180/200 mm. Prvky jsou součástí příhradového nosníku, nejdelší délkový rozměr průřezu je 5,7 m. Diagonály můžou vybočit ve směru osy z i y . Maximální vzpěrná délka je rovna 5,7 m vzhledem k oběma lokálním osám. Kritická je ovšem vzpěrná délka 3,4 m, na této diagonále se nachází největší tlaková síla. Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:



šířka průř. b :	180	[mm]
výška průř. h :	200	[mm]
plocha průř. A :	36000	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	1,2E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	9,7E+07	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	1200000	[mm ³]
modul průř. W_z :	1080000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	900000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	810000	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	57,7	[mm]
polom. setrvač. i_z :	52,0	[mm]

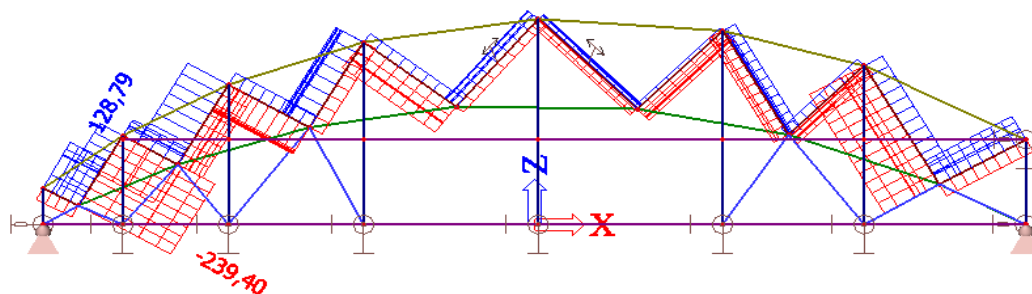
Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B191	Diagonály - OBDEL	0,000	NC1	-239,40	0,00	0,19	-0,02	0,13	0,00
B190	Diagonály - OBDEL	0,000	NC1	128,79	0,00	-0,54	0,00	0,38	0,00
B191	Diagonály - OBDEL	3,334	NC1	-238,88	0,00	-0,25	-0,02	-0,01	0,00
B230	Diagonály - OBDEL	0,000	NC1	3,23	0,00	0,32	-0,01	-0,20	0,00
B190	Diagonály - OBDEL	1,513	NC1	128,66	0,00	-0,80	0,00	-0,60	0,00
B194	Diagonály - OBDEL	0,000	NC1	-73,40	0,00	0,48	0,01	-0,30	0,00
B199	Diagonály - OBDEL	2,282	NC1	-39,77	0,00	0,05	-0,06	0,18	0,00
B23	Diagonály - OBDEL	2,194	NC1	25,92	0,00	0,02	0,07	0,19	0,00
B193	Diagonály - OBDEL	0,952	NC1	-63,75	0,00	-0,03	0,02	0,54	0,00
B23	Diagonály - OBDEL	0,000	NC1	25,67	0,00	0,34	0,07	-0,21	0,00
B230	Diagonály - OBDEL	2,623	NC1	3,56	0,00	-0,01	-0,01	0,21	0,00

Posouzení na vzpěr

Pro daný prvek je dominantní namáhání osovou silou. Průběh vnitřních sil na všech diagonálách je zobrazen na obr. 40.



Obr. 40: Průběh vnitřních sil spodního pásu příhradového nosníku.

Návrhové síly pro posouzení vzpěru s příslušnou vzpěrnou délkou:

	N - max max 3400	N + max	
N_{Ed} :	-239,40	128,80	[kN]
$V_{Ed,y}$:	0,12	1,24	[kN]
$V_{Ed,z}$:	0,00	0,00	[kN]
$M_{Ed,y}$:	1,44	0,70	[kNm]
$M_{Ed,z}$:	0,00	0,00	[kNm]

Posouzení je spočítáno dle kapitoly 6.2.3 normy [4] pro osovou sílu s vlivem vzpěru.

Pro tahovou sílu je posudek založen na základě vzorců z kapitoly 6.2.3 normy [4]:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A},$$

$$\sigma_{m,i,d} = \frac{M_{Ed,i}}{W_i},$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (12)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

kde k_m označuje součinitel redistribuce napětí a vliv nehomogenit.

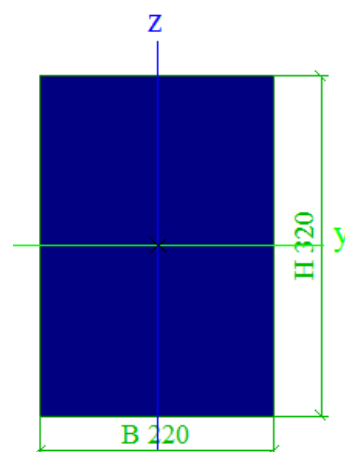
Posouzení je provedeno na základě vzorců (11) a (12). Vypočítané hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu:

tahové napětí	$\sigma_{t,0,d}$:	0,00	3,58	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{t,0,d}$:	11,18	11,18	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	0,00	32,00	[%]	Vyhovuje

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	1,20	0,58	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	0,00	0,00	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vliv nehomogenit	k_m :	0,7	0,7	[-]	(pro obd. průřezy)
$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,07	0,36	[-]	
$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,05	0,35	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ϱ :	7,38	35,59	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ϱ :	5,17	34,51	[%]	Vyhovuje
štíhlost k ose y	λ_y :	58,89	58,89	[-]	
štíhlost k ose z	λ_z :	65,43	65,43	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,98	0,98	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	1,09	1,09	[-]	
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	0,1	[-]	
	k_y :	1,01	1,01	[-]	
	k_z :	1,13	1,13	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,78	0,78	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	0,69	0,69	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,65	0,04	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,70	0,03	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ϱ :	64,68	3,59	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ϱ :	69,97	2,51	[%]	Vyhovuje

4.4.4 Sloupy podpírající boční přístavek

Pro sloupy na čelních stěnách je zvolen průřez 220/320 mm. Nejdelší délkový rozměr průřezu je 9 m. Kritická vzpěrná délka pro vybočení kolmo na osu y je 7,1 m. Pro vybočení kolmo k ose z , je vzpěrná délka na kritickém prvku 3,9 m. Sloupy můžou ztratit příčnou a torzní stabilitu v délkách odpovídajících vzpěrným délkám. Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:



šířka průř. b :	220	[mm]
výška průř. h :	320	[mm]
plocha průř. A :	70400	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	6E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	2,8E+08	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	3754667	[mm ³]
modul průř. W_z :	2581333	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	2816000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	1936000	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	92,4	[mm]
polom. setrvač. i_z :	63,5	[mm]

Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B434	Sloupky - OBDEL	3,898	NC1	-111,12	0,00	-0,30	-0,04	0,00	0,00
B308	Sloupky - OBDEL	0,000	NC1	53,43	0,00	-0,08	-0,04	0,00	0,00
B362	Sloupky - OBDEL	0,000	NC1	-18,79	-27,08	0,58	0,00	-2,02	0,75
B362	Sloupky - OBDEL	3,501	NC1	-17,55	26,33	0,58	0,00	0,01	-0,57
B354	Sloupky - OBDEL	0,000	NC1	-47,04	0,00	-37,69	-0,04	0,00	0,00
B354	Sloupky - OBDEL	5,249	NC1	-74,13	0,00	37,69	-0,04	0,00	0,00
B357	Sloupky - OBDEL	0,000	NC1	0,62	0,00	0,50	-0,16	0,00	0,00
B426	Sloupky - OBDEL	0,000	NC1	-7,87	0,00	-0,24	0,13	-0,31	0,00
B354	Sloupky - OBDEL	2,625	NC1	-60,59	0,00	0,00	-0,04	-49,46	0,00
B309	Sloupky - OBDEL	2,385	NC1	28,06	0,00	0,00	0,01	11,44	0,00
B362	Sloupky - OBDEL	1,750	NC1	-18,17	-0,38	0,58	0,00	-1,01	-23,28
B329	Sloupky - OBDEL	1,750	NC1	-32,57	0,08	-0,43	0,00	0,32	5,09

Pro daný prvek je kritický posudek na ztrátu příčné a torzní stability. Posouzení klopení v kombinaci s tlakem dle kapitoly 6.3.3 je stručně nastíněno vzorci:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78b^2}{hl_{el}} E_{0,05},$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}},$$

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1$$
(13)

kde k_{crit} je součinitel zohledňující redukovanou pevnost v ohybu v důsledku klopení.

Návrhové síly pro posouzení 4 stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle vztahů (11), (12) a (13):

	N - max $L_{b,y} = 7,1 \text{ m}$ $L_{b,z} = 3,1 \text{ m}$	V max	My max	Mz max	
N _{Ed} :	-111,12	-73,8	-60,6	53,00	[kN]
V _{Ed,y} :	0,22	38,00	0,00	0,00	[kN]
V _{Ed,z} :	0,00	27,10	0,00	0,00	[kN]
M _{Ed,y} :	0,00	0,00	50,00	2,00	[kNm]
M _{Ed,z} :	0,00	0,00	0,00	23,30	[kNm]

Únosnost v tahu rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.2):

tahové napětí	$\sigma_{t,0,d}$:	0,00	0,00	0,00	0,75	[MPa]
návrhová pevn.	$f_{t,0,d}$:	11,18	11,18	11,18	11,18	[MPa]
využití průřezu	ρ :	0,00	0,00	0,00	6,73	[%] Vyhovuje

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	1,58	1,05	0,86	0,00	[MPa]
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	14,78	14,78	14,78	14,78	[MPa]
využití průřezu	ρ :	10,68	7,09	5,82	0,00	[%] Vyhovuje

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y	b_y :	220	220	220	220	[mm]
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	320	320	320	320	[mm]
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	0,67	0,67	0,67	[-]
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	147	147	147	147	[mm]
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	214	214	214	214	[mm]
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,01	1,21	0,00	0,00	[MPa]

smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,00	0,86	0,00	0,00	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	2,16	2,16	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	0,32	56,05	0,00	0,00	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	0,00	39,97	0,00	0,00	[%]	Vyhovuje

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	0,00	0,00	13,32	0,53	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	0,00	0,00	0,00	9,03	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vliv nehomogenit	k_m :	0,7	0,7	0,7	0,7	[-]	
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d}$:	15,74	15,74	15,74	15,74	[MPa]	
$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,00	0,00	0,85	0,44	[-]	
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,00	0,00	0,59	0,60	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	0,00	0,00	84,59	43,52	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	0,00	0,00	59,21	59,70	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,01	0,01	0,85	0,44	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,01	0,01	0,60	0,60	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	1,14	0,50	84,93	43,52	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	1,14	0,50	59,55	59,70	[%]	Vyhovuje

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y	λ_{y} :	76,86	76,86	76,86	76,86	[-]	
štíhlost k ose z	λ_{z} :	61,41	61,41	61,41	61,41	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	1,28	1,28	1,28	1,28	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	1,02	1,02	1,02	1,02	[-]	
souč. pro prvky splňující meze zakřív.	β_c :	0,1	0,1	0,1	0,1	[-]	
	k_y :	1,37	1,37	1,37	1,37	[-]	
	k_z :	1,06	1,06	1,06	1,06	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,54	0,54	0,54	0,54	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	0,75	0,75	0,75	0,75	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,20	0,13	0,95	0,44	[-]	

$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,14	0,09	0,67	0,60	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	19,71	13,09	95,33	43,52	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	14,22	9,44	66,96	59,70	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a tlaku s vlivem stability (EN 5 - 6.3.3):

poměr účinné délky dle tab. 6.1	l_{ef}/l :	0,90	0,90	0,90	0,90	[-]	
úč. délka nosníku závislá na BC a zat.	l_{ef} :	33040	33040	33040	33040	[mm]	
kritické nap. v ohybu	$\sigma_{m,crit}$:	31,42	31,42	31,42	31,42	[MPa]	
pom. štíhlost v ohybu	$\lambda_{rel,m}$:	0,87	0,87	0,87	0,87	[-]	
souč. klopení	k_{crit} :	0,90	0,90	0,90	0,90	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} =$		0,14	0,09	0,95	0,00	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	14,22	9,44	95,20	0,14	[%]	Vyhovuje

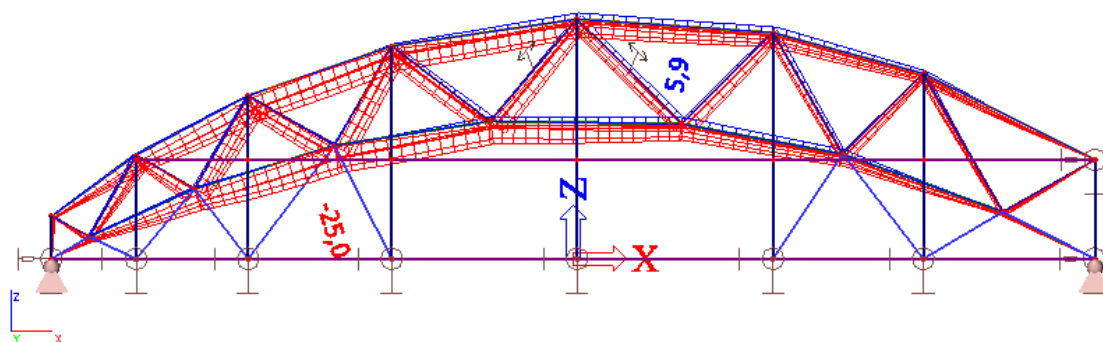
4.4.5 Shrnutí

Obdobným způsobem byly navrženy a posouzeny vaznice, svislice příhradového nosníku, vzpěradla a vodorovné prvky bočního přístavku. Všechny navrhované průřezy vyhoví na mezní stav únosnosti. Materiál použitý pro veškeré dřevěné prvky je lepené lamelové dřevo GL24h. Seznam navržených průřezů:

- Horní pásnice 150/280
- Spodní pásnice 220/220
- Diagonály 180/200
- Vaznice 240/380
- Vzpěradla 120/120
- Sloupy 220/320
- Vodorovné prvky bočního přístavku 220/220

4.5 Posouzení mezního stavu použitelnosti

Maximální okamžitý svislý průhyb konstrukce je zobrazen na obrázku 41 Obr. 41.



Obr. 41: Okamžitý průhyb konstrukce.

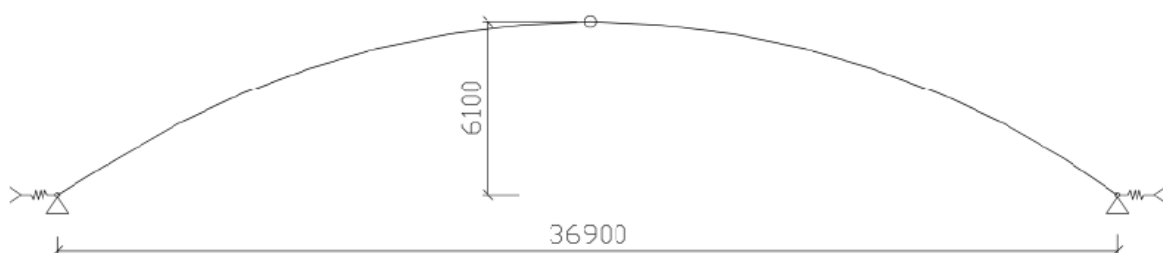
Všechny navržené prvky vyhoví na mezní stav použitelnosti. Podrobný výpočet okamžitého i dlouhodobého přetvoření konstrukce je uveden u zvolené optimální varianty.

5 Varianta II

Druhou variantou je návrh nosné konstrukce skládající se z hlavních zakřivených nosníků a vaznic. Navrženy jsou boční přístavky obdobné jako v předešlé variantě. Nosníky mají menší konstrukční výšku než příhradové vazníky varianty I, i proto je navíc navržena nadstavba na straně přiléhající železobetonové budovy.

5.1 Popis konstrukce

Hlavním nosným prvkem je plnostěnný trojkloubový nosník zakřivený do oblouku odpovídajícího tvaru předešlé varianty. Prvním a posledním příčným prvkem jsou krajní obloukové nosníky menšího průřezu, tyto nosníky jsou ukloněné o cca 20° a spojují okrajové vaznice s čelními sloupy. Obloukové nosníky jsou ukládány kloubově na podpůrnou konstrukci. Rozpětí nosníku je 36,9 m, jeho vzepětí je 6,1 m. Nosníky jsou ukládány ve vzdálenostech 4,25 m. Statické schéma nosníku lze shlédnout na obr. 42. Na čelních stranách objektu jsou navrženy přístavky s trojúhelníkovým příčným řezem.



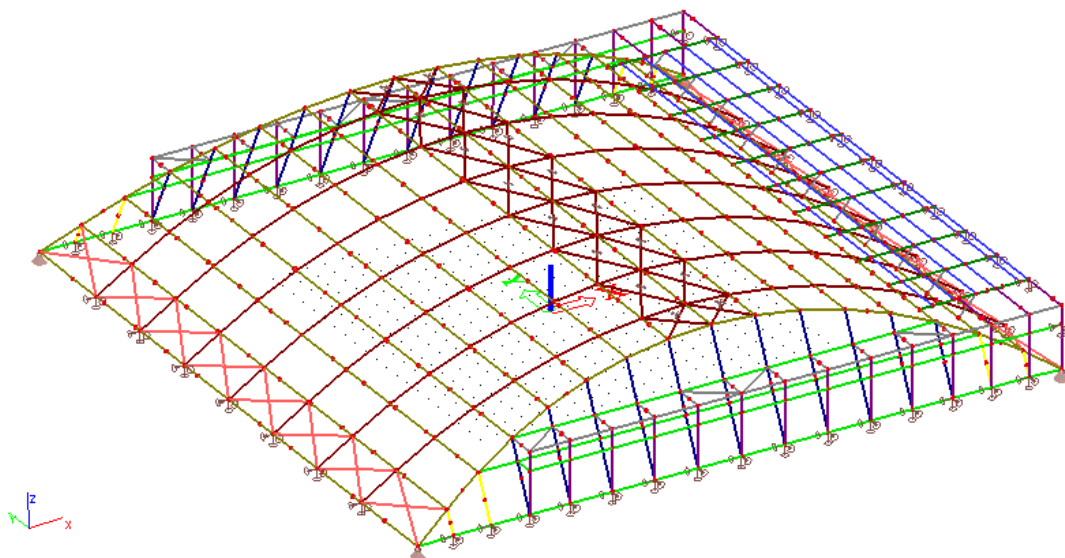
Obr. 42: Statické schéma obloukového nosníku.

Na straně přiléhající k přidružené budově se nachází konstrukce přístavku s vodorovnou střešní plochou. Střešní plocha nadstavby má stejnou výškovou úroveň jako střecha přilehlé budovy. Vodorovná střešní plocha je kotvena na hlavní obloukové nosníky a na železobetonovou monolitickou budovu. Přibližně v polovině rozpětí je dodatečně podpírána šikmými vzpěrami.

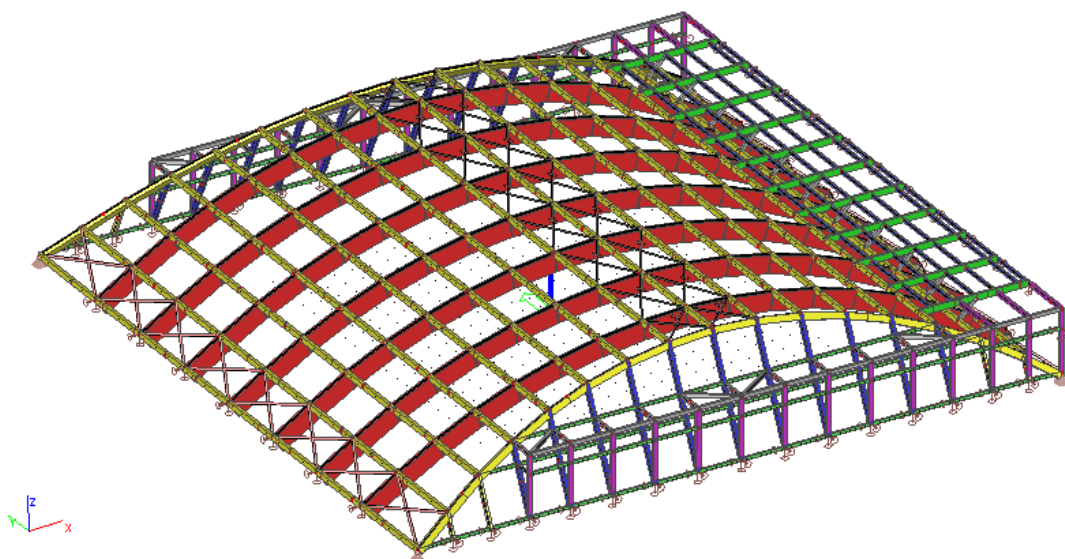
Zatížení je do příhradového nosníku vnášeno dominantně vaznicemi dlouhými 4,25 m (tento rozměr odpovídá také rozteči hlavních nosníků). Chování veškerých styčníků je i v této variantě uvažováno kloubové. Dřevěná hala je prostorově ztužena dvěma druhy zavětrování. Prvním druhem jsou ocelové vzpěry tvořící okapové ztužidla, druhým případem jsou ocelové táhla umístěné vodorovně uprostřed rozpětí hlavních nosníků.

5.2 Prostorový model konstrukce a výpočet

Pro výpočet byl vytvořen 3D model konstrukce obsahující prutové prvky. Vnější vazby jsou ve vodorovném směru uvažovány polotuhé, hodnoty tuhostí popisuje kapitola 3.4. Kombinace zatěžovacích stavů lze nalézt v kapitole 3.5.5. Model konstrukce je zobrazen na obrázku 43 a 44.



Obr. 43: Osové zobrazení modelu konstrukce.

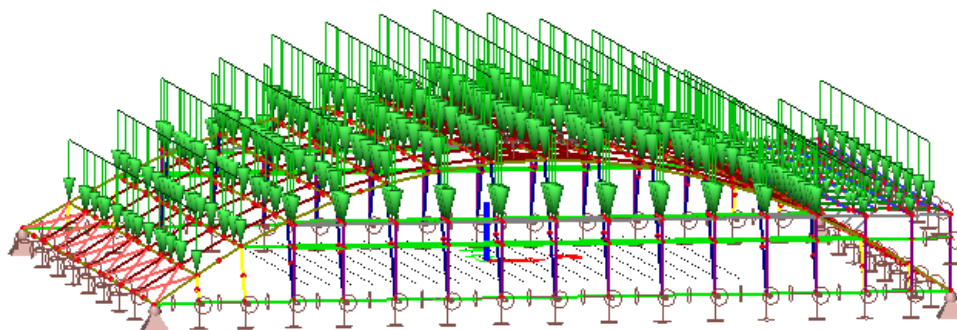


Obr. 44: Zobrazení modelu konstrukce s vykreslenými nosnými prvky.

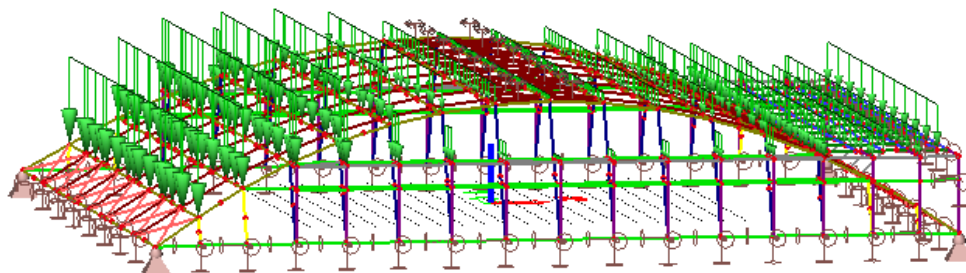
Výpočet byl proveden s uvážením konstrukčních a geometrických nelinearit. Ocelové táhla mají nadefinovanou vlastnost vyloučení tlaku. Řešení konstrukce metodou konečných prvků je tedy prováděno **iteračně** s uvážením **geometrické matice tuhosti**.

5.3 Zatížení konstrukce

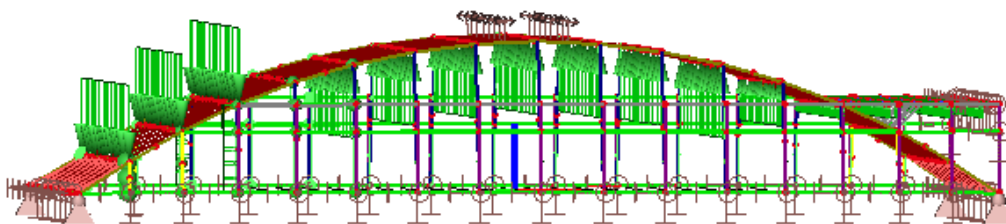
Výpočet velikostí účinků stálých, užitných a klimatických zatížení je uveden v kapitole 3.5. Jednotlivá plošná zatížení z této kapitoly jsou vynásobena příslušnými zatěžovacími šířkami a aplikována na model konstrukce v softwaru Scia Engineer [21]. Do modelu bylo zatížení vkládáno na pruty jako bodové, rovnoměrně spojitě a nerovnoměrně spojitě. Vybrané zatěžovací stavy jsou zobrazeny na obrázcích 45, 46 a 47.



Obr. 45: Zatížení rovnoměrně rozloženým sněhem.



Obr. 46: Zatížení sněhem s uspořádáním dle české národní přílohy normy [2].



Obr. 47: Zatížení příčným větrem pro vnitřní tlak $c_{pi} = -0,3$.

5.4 Návrh a posouzení hlavních nosných prvků varianty na mezní stav únosnosti

V konstrukci se nacházejí rozdílné průřezy z lepeného lamelového dřeva. Průřezy jsou rozděleny na prvek hlavních nosníků, vaznice, krajní ukloněné oblouky, sloupky bočních přístavků, vodorovné prvky bočních přístavků, podélné a příčné prvky nadstavby. Vybrané průřezové charakteristiky jsou opět stanoveny na základě vzorců (8).

Využití průřezu je stanoveno dle vzorce (9). Vnitřní síly byly získány nelineární globální analýzou konstrukce.

5.4.1 Hlavní nosníky

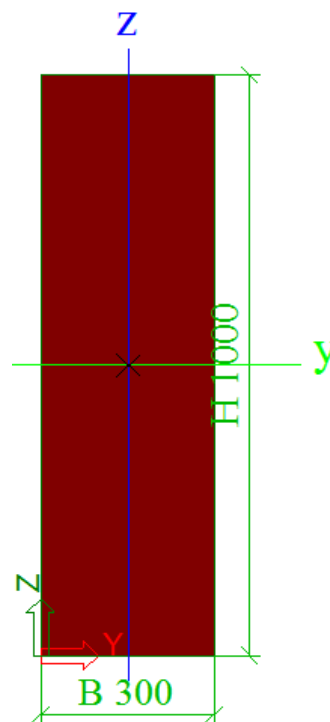
Hlavní trojkloubové nosníky jsou navrženy průřezu 300/1000 mm. Nosníky z lepeného lamelového dřeva mají rozpětí 36,9 m a vzepětí 6,1 m. Nosníkům je bráněno vybočení ze svislé roviny vaznicemi, které jsou navrženy v roztečích cca 2,5 m. Vaznice jsou u horního líce nosníku, spodnímu líci je bráněno ve vybočení ze svislé roviny konstrukčními vzpěrami umístěných ve vzdálenostech maximálně 9,9 m (obr. 48). Vybočení kolmo na osu y není bráněno, je tedy stanovena vzpěrná délka podle vzorce (14) z literatury [6].

$$L_{ef} = \frac{l}{1,75} \cdot \sqrt{1 + 2k} \quad (14)$$

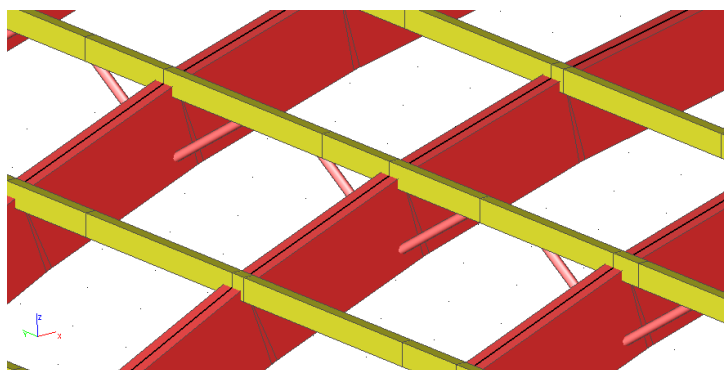
$$k = \frac{f}{l}$$

kde l je rozpětí nosníku a f je jeho vzepětí.

Výsledná vzpěrná délka proti vybočení kolmo na osu y je 24,4



m.



Obr. 48: Konstrukční vzpěry stabilizující hlavní nosníky.

Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b:	300	[mm]
výška průř. h:	1000	[mm]
plocha průř. A:	300000	[mm ²]
mom. setrvač. I _y :	2,5E+10	[mm ⁴]
mom. setrvač. I _z :	2,3E+09	[mm ⁴]
modul průř. W _y :	5E+07	[mm ³]
modul průř. W _z :	1,5E+07	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S _y :	3,8E+07	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S _z :	1,1E+07	[mm ³]
polom. setrvač. i _y :	288,7	[mm]
polom. setrvač. i _z :	86,6	[mm]

Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1 - Unosnost

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B774	hlavní - OBDEL	2,481	NC1 - Unosnost	-260,72	11,42	-0,83	-7,01	153,15	32,43
B826	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	1,12	25,97	-72,59	-12,40	178,06	-62,58
B846	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-1,64	-26,93	-10,50	13,77	26,67	60,31
B814	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-2,88	26,89	-59,64	-12,85	146,98	-64,99
B787	hlavní - OBDEL	2,401	NC1 - Unosnost	-6,09	23,44	-79,15	-13,93	0,00	-0,01
B761	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-2,67	25,10	79,41	-12,55	0,00	0,20
B847	hlavní - OBDEL	2,237	NC1 - Unosnost	-5,03	-26,75	-14,16	13,96	0,00	0,03
B744	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-169,15	2,79	22,44	-1,26	-10,14	-46,17
B763	hlavní - OBDEL	2,487	NC1 - Unosnost	-193,13	-11,65	9,44	7,67	415,66	3,82
B813	hlavní - OBDEL	2,476	NC1 - Unosnost	-142,83	-12,42	-34,61	4,13	217,48	-66,08
B762	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-219,88	-11,22	42,86	4,79	297,18	63,39

Prvky jsou namáhané primárně ohybem v kombinaci s tlakem. Pro vybrané prvky je rozhodující dvojosý ohyb. Jelikož jsou vaznice připojeny k hlavním nosníkům excentricky,

vzniká zde navíc krouticí moment dosahující největších hodnot 14 kNm. Postup posouzení na kombinaci vzpěru a ohybu, kombinaci vzpěru a ztráty příčné a torzní stability, na posouzení smyku je naznačen výše (viz vzorce (10), (11), (12) a (13)).

Posouzení torzního namáhání je provedeno dle vztahů kapitoly 6.1.8 normy [4]:

$$\begin{aligned}\tau_{tor,d} &\leq k_{shape} f_{v,d}, \\ \tau_{tor,d} &= \frac{T_{Ed}}{W_t}, \\ W_t &= \beta b^2 h, \\ k_{shape} &= \begin{cases} 1,2, & \text{pro kruhový průřez} \\ \min \left\{ 1 + 0,15 \frac{h}{b}, \right. & \text{pro obdélníkový průřez,} \\ 2,0 & \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

kde $\tau_{tor,d}$ je návrhové napětí ve smyku od kroucení,

kde W_t je průřezový modul v kroucení,

a k_{shape} je součinitel závislý na tvaru průřezu.

Návrhové síly pro posouzení 4 stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle vztahů (11), (12), (13) a (15):

Veličina Symb. Průř. 1 Průř. 2 Pr. 3 Pr. 4 Jedn. Pozn.

	N – max L _{b,y} = 37000 L _{b,z} = 10000	M max L _{b,y} = 37000 L _{b,z} = 10000	V max	T max	
N _{Ed} :	-261,00	-205,00	-10,0	-10,0	[kN]
V _{Ed,y} :	11,00	11,00	80,00	65,00	[kN]
V _{Ed,z} :	1,00	8,00	27,00	27,00	[kN]
M _{Ed,y} :	174,00	416,00	10,00	5,00	[kNm]
M _{Ed,z} :	35,00	7,00	10,00	5,00	[kNm]
T _{Ed} :	8,00	8,00	8,00	15,00	[kNm]

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	0,87	0,68	0,03	0,03	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	14,78	14,78	14,78	14,78	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	5,88	4,62	0,23	0,23	[%]	Vyhovuje

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y	b_y :	300	300	300	300	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	1000	1000	1000	1000	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	0,67	0,67	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	201	201	201	201	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	670	670	670	670	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,08	0,08	0,60	0,49	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,01	0,06	0,20	0,20	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	2,16	2,16	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	3,81	3,81	27,69	22,50	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	0,35	2,77	9,35	9,35	[%]	Vyhovuje

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	3,48	8,32	0,20	0,10	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	2,33	0,47	0,67	0,33	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vl. nehom.	k_m :	0,7	0,7	0,7	0,7	[-]	
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d}$:	14,78	14,78	14,78	14,78	[MPa]	
$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,35	0,58	0,05	0,02	[-]	
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,32	0,43	0,05	0,03	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	34,59	58,49	4,51	2,25	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	32,26	42,55	5,46	2,73	[%]	Vyhovuje

Torzní namáhání (EN 5 - 6.1.8):

souč. závislý na poměru h/b	β :	0,208	0,208	0,208	0,208	[-]	
průř. modul v kroucení	W_t :	0,019	0,019	0,019	0,019	[m ³]	
napětí ve smyku od kroucení	$\tau_{tor,d}$:	0,43	0,43	0,43	0,80	[MPa]	
souč. závislý na tvaru průř.	k_{shape} :	1,50	1,50	1,50	1,50	[-]	
$k_{shape} \cdot \tau_{tor,d} =$		0,64	0,64	0,64	1,20	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	2,16	2,16	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	29,73	29,73	29,73	55,75	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,35	0,59	0,05	0,02	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,33	0,43	0,05	0,03	[-]	

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	34,93	58,70	4,51	2,26	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	32,61	42,76	5,46	2,73	[%]	Vyhovuje

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y	λ_y :	84,87	84,87	84,87	84,87	[-]
štíhlost k ose z	λ_z :	114,3	114,3	114,3	114,3	[-]
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	1,41	1,41	1,41	1,41	[-]
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	1,90	1,90	1,90	1,90	[-]
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	0,1	0,1	0,1	[-]
	k_y :	1,55	1,55	1,55	1,55	[-]
	k_z :	2,39	2,39	2,39	2,39	[-]
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,46	0,46	0,46	0,46	[-]
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	0,26	0,26	0,26	0,26	[-]

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,48 \quad 0,69 \quad 0,05 \quad 0,03 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,55 \quad 0,60 \quad 0,06 \quad 0,04 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	47,50	68,63	5,00	2,75	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	54,79	60,24	6,32	3,59	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a tlaku s vlivem stability (EN 5 - 6.3.2):

poměr účinné délky dle tab. 6.1	l_{ef}/l :	0,90	0,90	0,90	0,90	[-]
úč. délka nosníku závislá na BC a zat.	l_{ef} :	34400	34400	34400	34400	[mm]
kritické nap. v ohybu	$\sigma_{m,crit}$:	17,96	17,96	17,96	17,96	[MPa]
pom. štíhlost v ohybu	$\lambda_{rel,m}$:	1,16	1,16	1,16	1,16	[-]
souč. klopení	k_{crit} :	0,69	0,69	0,69	0,69	[-]

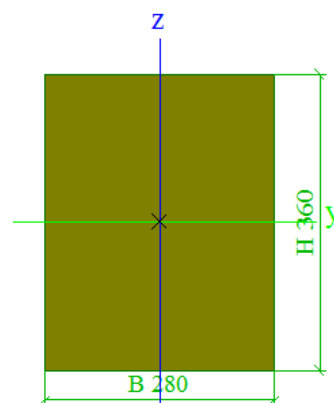
$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} = 0,34 \quad 0,84 \quad 0,01 \quad 0,01 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	34,06	83,65	0,90	0,87	[%]	Vyhovuje
---------------------------------------	----	--------------	--------------	-------------	-------------	-----	-----------------

5.4.2 Krajiní ukloněné oblouky

Ukloněné obloukové prvky na čelních stranách konstrukce jsou navrženy průřezu 280/360 mm. Úhel úklonu prvků od svislé roviny je přibližně 20°. Nosníky svou geometrií přispívají k prostorové tuhosti objektu.

Prvky jsou podepřeny proti vybočení ze své poddajnější osy vaznicemi. Ze své tužší osy je prvkům bráněno ve vybočení sloupy umístěnými na čelní straně objektu. Vzpěrná délka je tedy v obou směrech 2,6 m.



Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b:	250	[mm]
výška průř. h:	300	[mm]
plocha průř. A:	75000	[mm ²]
mom. setrvač. I _y :	5,6E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I _z :	3,9E+08	[mm ⁴]
modul průř. W _y :	3750000	[mm ³]
modul průř. W _z :	3125000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S _y :	2812500	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S _z :	2343750	[mm ³]
polom. setrvač. i _y :	86,6	[mm]
polom. setrvač. i _z :	72,2	[mm]

Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1 - Unosnost

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B528	kraj. oblouky - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-55,75	5,14	0,30	-0,59	-0,96	-1,26
B491	kraj. oblouky - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	66,18	0,63	-1,31	-1,36	1,02	-1,88
B609	kraj. oblouky - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	0,82	-13,22	4,44	1,87	-9,23	30,08
B274	kraj. oblouky - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	14,01	12,89	3,00	-1,23	-6,21	-31,07
B687	kraj. oblouky - OBDEL	1,260	NC1 - Unosnost	32,92	-8,80	-3,82	0,24	-1,90	8,52
B271	kraj. oblouky - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	15,42	12,34	2,41	-3,59	0,04	-0,08
B551	kraj. oblouky - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	4,41	-12,00	2,30	2,48	0,10	0,21
B276	kraj. oblouky - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	32,28	-8,55	-1,72	-0,47	5,33	30,44

Pro vybrané prvky je rozhodující dvojosý ohyb. Návrhové síly pro posouzení průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle vztahů (12):

Veličina	Symbol	Průř. 2	Jednotka	Poznámka
	N_{Ed} :	-30,00	[kN]	
	$V_{Ed,y}$:	23,00	[kN]	
	$V_{Ed,z}$:	11,00	[kN]	
	$M_{Ed,y}$:	10,00	[kNm]	
	$M_{Ed,z}$:	32,00	[kNm]	
	T_{Ed} :	2,00	[kNm]	
tlakové \parallel napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	0,40	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	14,78	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	2,71	[%]	Vyhovuje
Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):				
šířka průřezu prvku y-y	b_y :	250	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	300	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	168	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	201	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,69	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,33	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	31,84	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	15,23	[%]	Vyhovuje
Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):				
napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	2,67	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	10,24	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vliv nehomogenit	k_m :	0,7	[-]	
štíhlost k ose y	λ_y :	30,02	[-]	
štíhlost k ose z	λ_z :	36,03	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,50	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	0,60	[-]	
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	[-]	
	k_y :	0,63	[-]	
	k_z :	0,69	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,97	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	0,96	[-]	

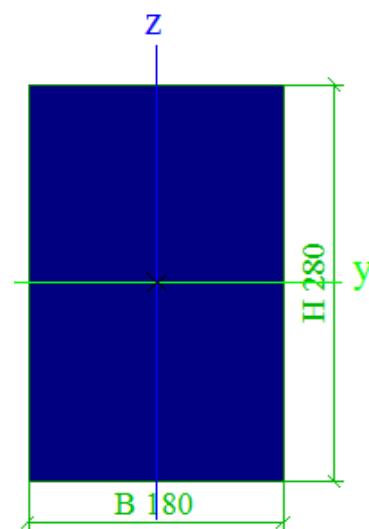
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,65 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,79 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	64,84	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	79,24	[%]	Vyhovuje

5.4.3 Sloupy podpírající boční přístavek

Stejně jako v předešlé variantě jsou navrženy sloupy tvořící čelní stěnu stavby. Vzhledem k nižší konstrukční výšce zastřešení a tedy i menší délce sloupů je namáhání v této variantě menší. Pro sloupy je tudíž zvolen průřez 180/200 mm. Nejdelší délkový rozměr průřezu je 6,7 m. Kritická vzpěrná délka pro vybočení kolmo na osu y i z je 4,6 m. Sloupy můžou ztratit příčnou a torzní stabilitu v délkách odpovídajících vzpěrným délkám. Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:



šířka průř. b:	180	[mm]
výška průř. h:	280	[mm]
plocha průř. A:	50400	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	3,3E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	1,4E+08	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	2352000	[mm ³]
modul průř. W_z :	1512000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	1764000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	1134000	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	80,8	[mm]
polom. setrvač. i_z :	52,0	[mm]

Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1 - Unosnost

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B369	B CS5 - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-61,27	-0,36	-2,19	-0,42	-3,00	-0,83
B39	B CS5 - OBDEL	2,812	NC1 - Unosnost	15,28	-0,13	12,54	0,05	0,00	0,00
B94	B CS5 - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-16,97	-1,64	8,11	-0,35	11,46	0,64
B114	B CS5 - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-14,31	1,70	8,02	0,33	13,77	-0,75
B33	B CS5 - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-20,45	-1,17	-26,10	0,35	23,89	1,19
B12	B CS5 - OBDEL	1,769	NC1 - Unosnost	5,71	0,45	13,90	-0,30	0,00	0,00
B108	B CS5 - OBDEL	0,297	NC1 - Unosnost	-55,83	-0,70	7,19	-0,47	-6,43	0,38
B538	B CS5 - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-46,94	-0,41	1,45	0,41	-5,47	0,80
B499	B CS5 - OBDEL	0,990	NC1 - Unosnost	2,40	1,09	-22,34	-0,29	-22,04	1,08
B11	B CS5 - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-23,01	1,25	-24,83	-0,40	21,65	-1,29
B114	B CS5 - OBDEL	1,189	NC1 - Unosnost	-14,17	1,66	7,79	0,34	23,18	1,19

Pro daný prvek je kritický posudek na vzpěr v kombinaci s ohybem. Návrhové síly pro posouzení vybraných stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle vztahů (10) a (11):

Veličina Symbol Průř. 1 Průř. 2 Jednotka Poznámka

	N_{Ed}	-61,27	-20,45	[kN]	
	$V_{Ed,y}$	3,00	27,00	[kN]	
	$V_{Ed,z}$	1,00	2,00	[kN]	
	$M_{Ed,y}$	8,80	23,89	[kNm]	
	$M_{Ed,z}$	0,74	1,19	[kNm]	
	T_{Ed}	0,50	0,50	[kNm]	

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové napětí	$\sigma_{c,0,d}$	1,22	0,41	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$	14,78	14,78	[MPa]	
využití průřezu	ρ	8,22	2,74	[%]	Vyhovuje

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y	b_y	180	180	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z	280	280	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr}	0,67	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$	121	121	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$	188	188	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$	0,13	1,20	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$	0,04	0,09	[MPa]	

návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	\mathcal{G} :	6,18	55,63	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	\mathcal{G} :	2,06	4,12	[%]	Vyhovuje
Kombinace ohybu a osového tahu (EN 5 - 6.2.3):					
napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	3,74	10,16	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	0,49	0,79	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vliv nehomogenit	k_m :	0,7	0,7	[-]	
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d}$:	15,95	15,95	[MPa]	
$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,26	0,67	[-]	
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,19	0,49	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	\mathcal{G} :	25,60	67,12	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	\mathcal{G} :	19,48	49,50	[%]	Vyhovuje
souč. závislý na poměru h/b	β :	0,208	0,208	[-]	
průř. modul v kroucení	W_t :	1886976	1886976	[mm ³]	
napětí ve smyku od kroucení	$\tau_{tor,d}$:	0,26	0,26	[MPa]	
souč. závislý na tvaru průř.	k_{shape} :	1,23	1,23	[-]	
$k_{shape} \cdot \tau_{tor,d} =$		0,33	0,33	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	[MPa]	
využití průřezu	\mathcal{G} :	15,16	15,16	[%]	Vyhovuje
Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):					
štíhlost k ose y	λ_y :	55,67	55,67	[-]	
štíhlost k ose z	λ_z :	86,60	86,60	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,93	0,93	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	1,44	1,44	[-]	
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	0,1	[-]	
	k_y :	0,96	0,96	[-]	
	k_z :	1,59	1,59	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,82	0,82	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	0,44	0,44	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,36	0,70	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,38	0,56	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	\mathcal{G} :	35,57	70,44	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	\mathcal{G} :	38,20	55,74	[%]	Vyhovuje

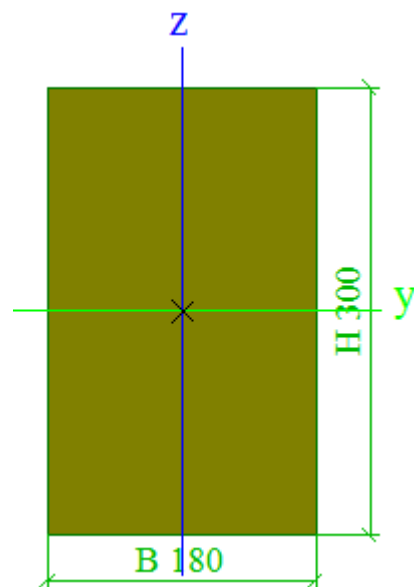
5.4.4 Vaznice

Pro vaznice je zvolen průřez 180/300 mm. Vaznice přenáší zatížení ze střešního pláště do hlavních nosníků, jejich funkce spočívá také v přenosu sil v podélném směru. Ukládány jsou na horní okraj hlavních nosníků.

Prvky jsou podepřeny proti vybočení ze své poddajnější osy střešním pláštěm. Ze své tužší osy není prvkům bráněno ve vybočení. Vzpěrná délka ve směru osy y je 4,2 m.

Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b :	180	[mm]
výška průř. h :	300	[mm]
plocha průř. A :	54000	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	4,1E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	1,5E+08	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	2700000	[mm ³]
modul průř. W_z :	1620000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	2025000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	1215000	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	86,6	[mm]
polom. setrvač. i_z :	52,0	[mm]



Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1 - Unosnost

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B165	Vaznice - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-64,04	0,08	-3,01	-0,86	-0,96	-0,06
B25	Vaznice - OBDEL	1,484	NC1 - Unosnost	36,43	0,37	-15,33	0,02	7,37	0,60
B945	Vaznice - OBDEL	0,118	NC1 - Unosnost	-25,28	-17,61	14,59	0,03	0,86	-0,22
B450	Vaznice - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	19,87	17,70	-18,03	-0,06	8,97	-8,78
B26	Vaznice - OBDEL	0,729	NC1 - Unosnost	-19,93	0,47	-23,16	0,63	-1,75	0,95
B27	Vaznice - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-20,03	0,49	22,54	0,63	-0,21	-1,06
B165	Vaznice - OBDEL	0,625	NC1 - Unosnost	-63,98	0,04	-0,96	-0,86	-2,21	-0,03
B35	Vaznice - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	24,32	0,25	11,19	0,92	0,07	-0,45
B157	Vaznice - OBDEL	1,500	NC1 - Unosnost	8,14	-0,03	-0,56	-0,01	-10,04	-0,05
B27	Vaznice - OBDEL	2,408	NC1 - Unosnost	-19,98	0,46	-0,12	0,63	26,86	-0,05
B246	Vaznice - OBDEL	1,500	NC1 - Unosnost	19,54	-2,03	-10,57	-0,05	8,76	-8,78
B298	Vaznice - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-0,52	-2,20	-1,51	0,05	5,41	5,06

Pro vybrané prvky je rozhodující vzpěr v kombinaci s ohybem. Návrhové síly pro posouzení průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle vztahů (10), (11) a (12):

Veličina	Symbol	Průř. 1	Průř. 2	Průř. 3	Jedn.	Pozn.
		N_{\max}	M_{\max}	V_{\max}		
N_{Ed} :		-65,00	-22,00	-16,00	[kN]	
$V_{Ed,y}$:		4,00	4,00	24,00	[kN]	
$V_{Ed,z}$:		1,00	1,00	13,00	[kN]	
$M_{Ed,y}$:		10,00	27,00	9,00	[kNm]	
$M_{Ed,z}$:		4,00	7,00	6,00	[kNm]	
T_{Ed} :		1,00	1,00	1,00	[kNm]	

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové \parallel napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	1,20	0,41	0,30	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	14,78	14,78	14,78	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	8,14	2,76	2,00	[%]	Vyhovuje

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y	b_y :	180	180	180	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	300	300	300	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	0,67	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	121	121	121	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	201	201	201	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,17	0,17	1,00	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,04	0,04	0,54	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	2,16	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	7,69	7,69	46,15	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	1,92	1,92	25,00	[%]	Vyhovuje

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	3,70	10,00	3,33	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	2,47	4,32	3,70	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vliv nehomogenit	k_m :	0,7	0,7	0,7	[-]	
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d}$:	15,85	15,85	15,85	[MPa]	

$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,34	0,82	0,37	[-]	
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,32	0,71	0,38	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	34,28	82,20	37,40	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	31,95	71,45	38,10	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tahu (EN 5 - 6.2.3):

$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,34	0,82	0,37	[-]	
$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,32	0,71	0,38	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	34,28	82,20	37,40	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	31,95	71,45	38,10	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,35	0,82	0,37	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,33	0,72	0,38	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	34,95	82,28	37,44	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	32,61	71,52	38,14	[%]	Vyhovuje

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y	λ_y :	48,73	48,73	48,73	[-]	
štíhlost k ose z	λ_z :	0,00	0,00	0,00	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,81	0,81	0,81	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	0,00	0,00	0,00	[-]	
souč. pro prvky splňující meze zakřív.	β_c :	0,1	0,1	0,1	[-]	
	k_y :	0,85	0,85	0,85	[-]	
	k_z :	0,49	0,49	0,49	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,89	0,89	0,89	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	1,03	1,03	1,03	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,43	0,85	0,40	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,40	0,74	0,40	[-]	

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	9:	43,42	85,29	39,65	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	9:	39,84	74,12	40,04	[%]	Vyhovuje

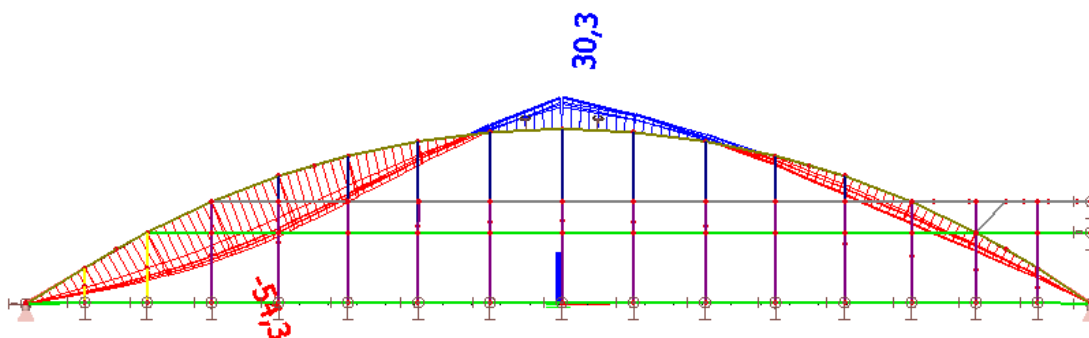
5.4.5 Shrnutí

Vodorovné prvky bočního přístavku, podélné a příčné prvky přístavku byly posouzeny na základě stejných principů. Všechny navrhované průřezy jsou z materiálu GL24h a vyhoví na mezní stav únosnosti. Seznam navržených průřezů:

- Hlavní nosníky 300/1000
- Krajní ukloněné nosníky 280/360
- Sloupy 180/280
- Vaznice 180/300
- Vodorovné prvky bočního přístavku 120/160
- Podélné prvky nadstavby 100/200
- Příčné prvky nadstavby 140/360

5.5 Posouzení mezního stavu použitelnosti

Maximální okamžitý svislý průhyb konstrukce je zobrazen na obrázku 41.

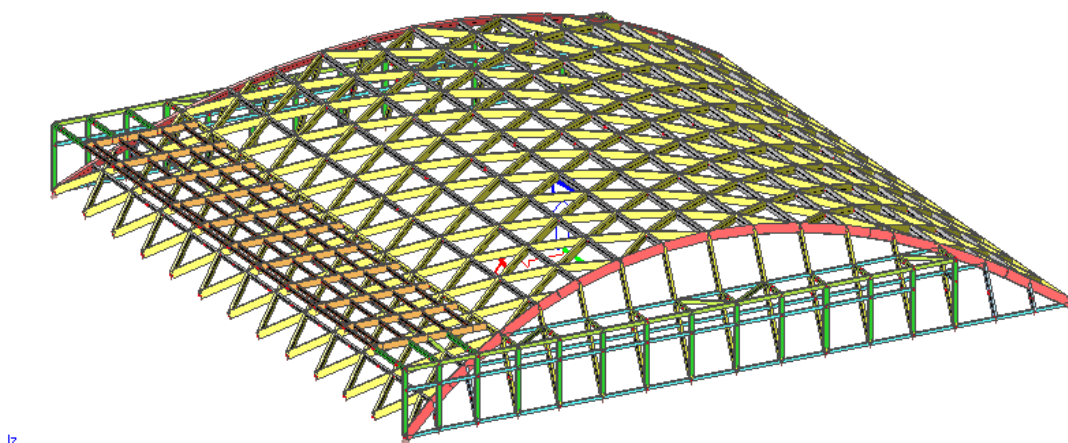


Obr. 49: Okamžitý průhyb konstrukce.

Všechny navržené prvky vyhoví na mezní stav použitelnosti. Podrobný výpočet okamžitého i dlouhodobého přetvoření konstrukce je uveden u zvolené optimální varianty.

6 Varianta III – realizovaná konstrukce

Třetí variantou je návrh již realizované stavby v Košicích. Varianta se vyznačuje velmi malou konstrukční výškou zastřešení. Střešní konstrukce je tvaru válcové klenby. Na straně přiléhající budovy je navržena nadstavba, jejíž střešní vodorovná rovina lícuje se střechou budovy. Na čelních stěnách objektu jsou i zde navrženy přístavky. Model konstrukce s vykreslenými objemy prvků je zobrazen na obr. 50.



Obr. 50: Model konstrukce s vykreslenými nosnými prvky.

Fotografie již realizované stavby, jejímž návrhem se varianta III zabývá, lze nalézt na obr. 51 a 52.



Obr. 51: Montáž konstrukce.



Obr. 52: Pohled na opláštění dřevěné haly z interiéru.

6.1 Popis konstrukce

Nosný systém je založen na trojúhelníkových segmentech, tvořených průběžným podélným prvkem a diagonálními pruty o délce 3 m. Segmenty jsou vyskládány do tvaru válcové klenby. Konstrukce má bodové vnější vazby po celém svém půdorysném obvodu. Prvky jsou na podpory ukládány kloubově. Na bočních stranách konstrukce se nachází obloukový nosník, ukloněný od svislé roviny přibližně o 20°. Rozpětí konstrukce je 36,9 m, její vzepětí je 5,7 m.

Vodorovná střešní plocha nadstavby je kotvena na hlavní obloukové nosníky a na železobetonovou monolitickou budovu. Přibližně v polovině rozpětí je dodatečně podpírána šikmými vzpěry.

Hlavní styčník spojující diagonální a podélné prvky ve vrcholech trojúhelníkových segmentů je uvažovaný jako polotuhý s definovanou hodnotou rotační tuhosti. Geometrie konstrukce, spolu s tuhostí hlavních styčníků zajišťuje prostorovou tuhost objektu.

6.2 Tuhost hlavního styčníku

Nejčastější styčník v dané konstrukci se skládá z příložných ocelových desek s otvory pro vruty, desky jsou umístěny na horním a dolním povrchu dřevěných trámů. Na každé straně diagonály je 12 vrutů SFS-WR-T 9x250, jejichž průměr je $d_1 = 9$ mm a efektivní délka $l_{\text{eff}} = 240$ mm. Vruty byly vrtány pod úhlem 45° vůči směru vláken. Plechová deska je montážně připevněna na průběžný prvek 4 vruty. Spodní část realizovaného styčníku je zobrazena na obr. 53 (obdobně je provedena část u horního povrchu).



Obr. 53: Styčník použitý pro spojení jednotlivých segmentů nosné konstrukce.

Chování tohoto styčníku není ani tuhé, ani kloubové. Je tedy potřebné stanovit hodnotu rotační tuhosti pro korektní globální analýzu konstrukce. Pro výpočet rotační tuhosti ve svislém směru je nutno stanovit modul prokluzu K_{ser} jak pro směr kolmý k vláknům (vytažení vrutu), tak pro směr rovnoběžný k vláknům (usmýknutí, otláčení vrutu). Modul prokluzu K_{ser} platí pro mezní stav použitelnosti, pro mezní stav únosnosti pak platí:

$$K_u = 2/3 K_{ser}. \quad (16)$$

Charakteristiky spoje potřebné pro výpočet jeho tuhosti jsou:

průměr vrutu	$d_1 =$	9	[mm]
efektivní délka vrutu	$l_{ef} =$	240	[mm]
úhel vrtání	$\alpha =$	45	[°]
počet vrutů	$n =$	12	[-]
hustota dřeva	$\rho_k =$	380	[kg/m ³].

Modul prokluzu na vytažení byl stanoven ze vzorce:

$$K_{ser, \parallel} = 25d_1 l_{eff}, \quad (17)$$

modul prokluzu na střih (rovnoběžně s vlákny):

$$K_{ser, \perp} = \rho_k d/20. \quad (18)$$

Pro získání modulu prokluzu pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ je použit vzorec:

$$K_{ser, \alpha} = k_{\perp} \sin^2 \alpha + k_{\parallel} \cos^2 \alpha, \quad (19)$$

Výsledný modul prokluzu pro MSÚ lze dopočítat dle vzorce (16). Doplnění do vzorců a konečné hodnoty tuhostí jsou:

jeden vrut na vytažení	$K_{ser,\parallel} = 25d_1l_{eff} =$	54000,0	[N/mm]
jeden vrut na vytažení	$K_{ser,\perp} = \rho_k^{1,5}d/20 =$	3333,4	[N/mm]
pod úhlem	$K_{ser} =$	28666,7	[N/mm]

rameno síly	$r =$	315,15	[mm]
počet vrutů	$n =$	12	[-]

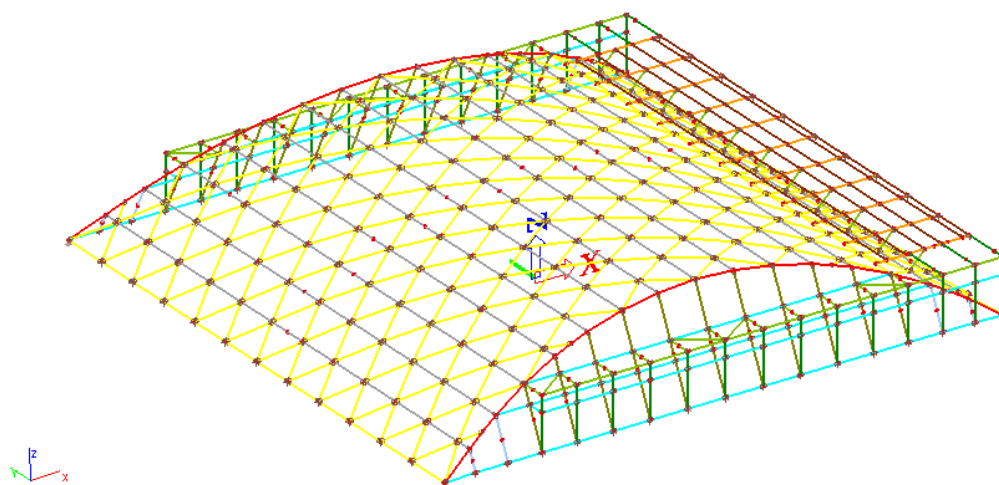
rotační tuhost směr z MSP	$K_{\varphi,ser} =$	34,17	[MNm/rad]
---------------------------	---------------------	-------	-----------

rotační tuhost směr z MSÚ	$K_{\varphi,u} =$	22,78	[MNm/rad]
---------------------------	-------------------	-------	-----------

Vypočtené tuhosti styčnicku jsou definovány ve výpočetním modelu konstrukce.

6.3 Prostorový model konstrukce a výpočet

Pro výpočet byl vytvořen 3D model konstrukce obsahující prutové prvky. Vnější vazby jsou ve vodorovném směru uvažovány polotuhé, hodnoty tuhostí popisuje kapitola 3.4. Kombinace zatěžovacích stavů lze nalézt v kapitole 3.5.5. Osový model konstrukce je zobrazen na obrázku 54.



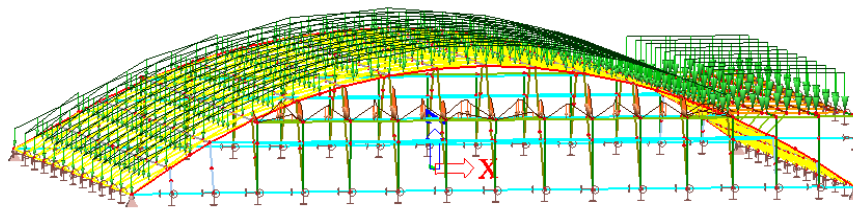
Obr. 54: Osově zobrazení modelu konstrukce.

Výpočet byl proveden s uvažováním konstrukčních a geometrických nelinearit. Ocelové táhla mají nadefinovanou vlastnost vyloučení tlaku. Řešení konstrukce metodou konečných prvků je tedy prováděno **iteračně** s uvažováním **geometrické matice tuhosti**.

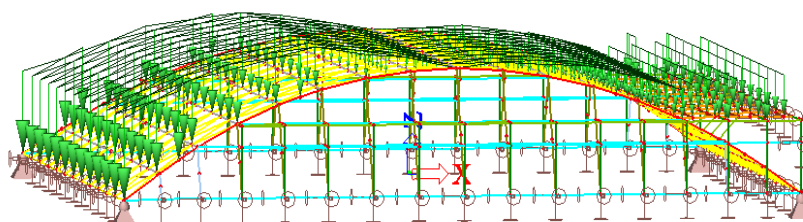
6.4 Zatížení konstrukce

Výpočet velikostí účinků stálých, užitných a klimatických zatížení je uveden v kapitole 3.5. Jednotlivé plošné zatížení z této kapitoly jsou vynásobeny příslušnými zatěžovacími šířkami a aplikovány na model konstrukce v softwaru Scia Engineer [21].

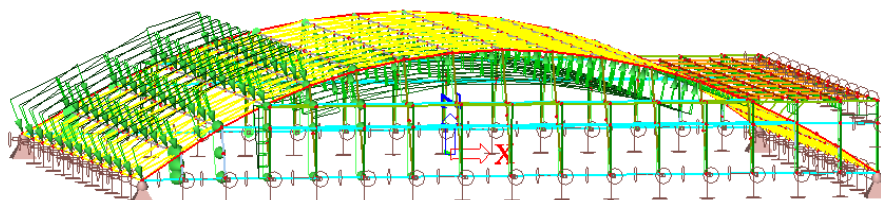
Do modelu bylo zatížení vkládáno na pruty jako bodové, rovnoměrně spojitě a nerovnoměrně spojitě. Vybrané zatěžovací stavy jsou zobrazeny na obrázcích 55, 56, 57 a 58.



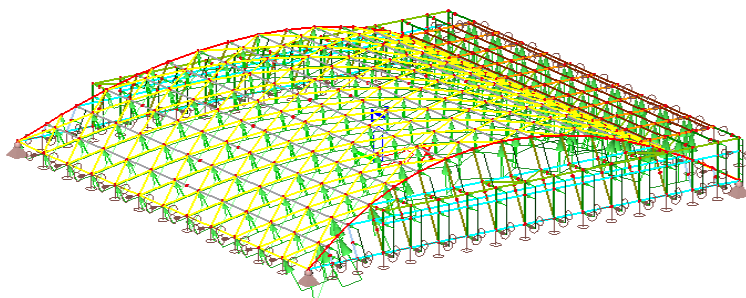
Obr. 55: Zatížení rovnoměrně rozloženým sněhem.



Obr. 56: Zatížení sněhem s uspořádáním dle české národní přílohy normy [2].



Obr. 57: Zatížení příčným větrem pro vnitřní tlak $c_{pi} = -0,3$.



Obr. 58: Zatížení podélným větrem pro vnitřní tlak $c_{pi} = +0,2$.

6.5 Návrh a posouzení hlavních nosných prvků varianty na mezní stav únosnosti

V konstrukci se nacházejí rozdílné průřezy z lepeného lamelového dřeva. Průřezy jsou rozděleny na diagonály trojúhelníkových segmentů, průběžné prvky segmentů, ukloněné krajní obloukové nosníky, boční sloupy podpírající přístavky, podélné prvky přístavků, příčné

a podélné vodorovné prvky nadstavby a vzpěry podpírající vodorovné prvky nadstavby. Vybrané průřezové charakteristiky jsou opět stanoveny na základě vzorců (8).

Využití průřezu je stanoveno dle vzorce (9). Vnitřní síly byly získány nelineární globální analýzou konstrukce.

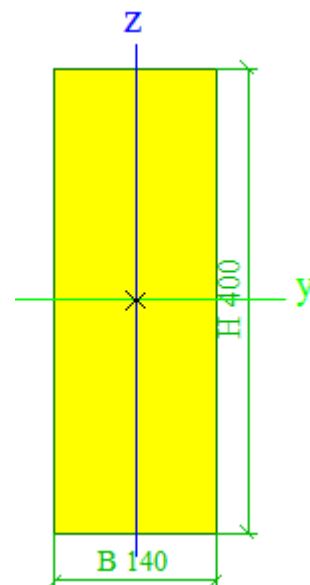
6.5.1 Diagonály trojúhelníkových segmentů

Průřez diagonálních prvků je navržen 140/400. Délkový rozměr těchto prvků je 2,9 m. Diagonálám je bráněno ve vybočení kolmo na osu z , střešním pláštěm. Vzájemné propojení diagonálních prvků je polotuhé, byla tedy stanovena vzpěrná délka L_{eff} pro vybočení kolmo k ose y dle vzorce:

$$L_{eff} = 0,9 L. \quad (20)$$

Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b :	140	[mm]
výška průř. h :	400	[mm]
plocha průř. A :	56000	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	7,5E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	9,1E+07	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	3733333	[mm ³]
modul průř. W_z :	1306667	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	2800000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	980000	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	115,5	[mm]
polom. setrvač. i_z :	40,4	[mm]

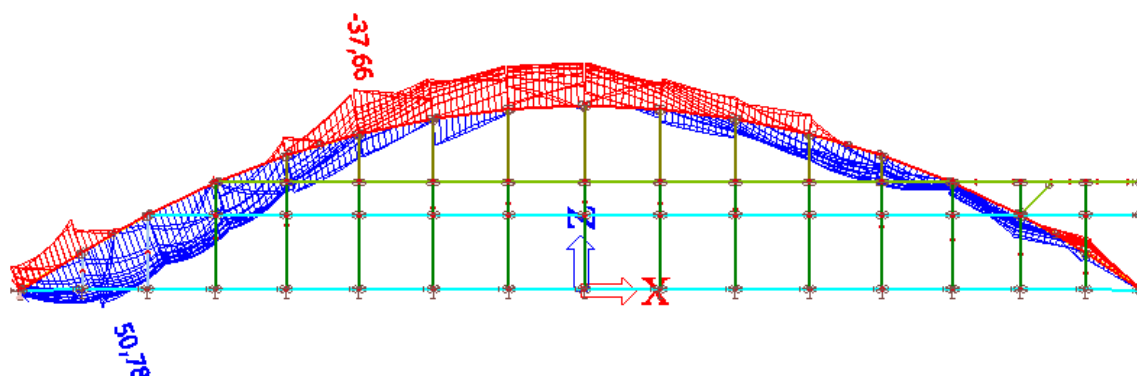


Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1 - Unosnost

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B774	hlavní - OBDEL	2,481	NC1 - Unosnost	-260,72	11,42	-0,83	-7,01	153,15	32,43
B826	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	1,12	25,97	-72,59	-12,40	178,06	-62,58
B846	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-1,64	-26,93	-10,50	13,77	26,67	60,31
B814	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-2,88	26,89	-59,64	-12,85	146,98	-64,99
B787	hlavní - OBDEL	2,401	NC1 - Unosnost	-6,09	23,44	-79,15	-13,93	0,00	-0,01
B761	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-2,67	25,10	79,41	-12,55	0,00	0,20
B847	hlavní - OBDEL	2,237	NC1 - Unosnost	-5,03	-26,75	-14,16	13,96	0,00	0,03
B744	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-169,15	2,79	22,44	-1,26	-10,14	-46,17
B763	hlavní - OBDEL	2,487	NC1 - Unosnost	-193,13	-11,65	9,44	7,67	415,66	3,82
B813	hlavní - OBDEL	2,476	NC1 - Unosnost	-142,83	-12,42	-34,61	4,13	217,48	-66,08
B762	hlavní - OBDEL	0,000	NC1 - Unosnost	-219,88	-11,22	42,86	4,79	297,18	63,39

Pro vybrané prvky je rozhodující tah v kombinaci s ohybem. Postup posouzení na kombinaci vzpěru a ohybu, kombinaci tahu a ohybu, kombinaci vzpěru a ztráty příčné a torzní stability, na posouzení smyku a torzního namáhání je naznačen výše (viz vzorce (10), (11), (12), (13) a (15)). Průběh návrhových ohybových momentů na diagonálách je graficky zobrazen na obr. 59:



Obr. 59 Průběh ohybových momentů na diagonálních prvcích.

Návrhové síly pro posouzení 4 stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle normových vztahů:

Veličina Symb. Pr. 1 Průř. 2 Průř. 3 Průř. 4 Jedn. Pozn.

	N + max	N - max	My max	Vy max	Mz max	
N _{Ed} :	370,8	-398,8	47,00	-100,0	[kN]	
V _{Ed,y} :	13,30	12,00	4,00	39,80	[kN]	
V _{Ed,z} :	0,00	0,00	0,00	3,81	[kN]	
M _{Ed,y} :	11,40	23,46	50,78	12,00	[kNm]	

$M_{Ed,z}$:	0,15	0,00	0,60	6,12	[kNm]
T_{Ed} :	0,00	0,00	0,00	1,08	[kNm]

Únosnost v tahu rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.2):

tahové \parallel napětí	$\sigma_{t,0,d}$:	6,62	0,00	0,84	0,00	[MPa]
návrhová pevn.	$f_{t,0,d}$:	11,18	11,18	11,18	11,18	[MPa]
využití průřezu	ρ :	59,23	0,00	7,51	0,00	[%] Vyhovuje

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové \parallel napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	0,00	7,12	0,00	1,79	[MPa]
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	14,78	14,78	14,78	14,78	[MPa]
využití průřezu	ρ :	0,00	48,18	0,00	12,08	[%] Vyhovuje

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y	b_y :	140	140	140	140	[mm]
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	400	400	400	400	[mm]
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	0,67	0,67	0,67	[-]
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	94	94	94	94	[mm]
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	268	268	268	268	[mm]
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,53	0,48	0,16	1,59	[MPa]
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,00	0,00	0,00	0,15	[MPa]
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	2,16	2,16	[MPa]
využití průřezu (směr y)	ρ :	24,66	22,25	7,42	73,80	[%] Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	0,00	0,00	0,00	7,06	[%] Vyhovuje

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	3,05	6,28	13,60	3,21	[MPa]
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	0,11	0,00	0,46	4,68	[MPa]
souč. redistrib. nap. a vliv nehom.	k_m :	0,7	0,7	0,7	0,7	[-]
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d}$:	15,40	15,40	15,40	15,40	[MPa]
$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,20	0,41	0,90	0,42	[-]
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,15	0,29	0,65	0,45	[-]
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	20,36	40,82	90,44	42,17	[%] Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	14,63	28,57	64,83	45,04	[%] Vyhovuje

Torzní namáhání (EN 5 - 6.1.8):

souč. závislý na poměru h/b	β :	0,208	0,208	0,208	0,208	[-]
-----------------------------	-----------	-------	-------	-------	-------	-----

průř. modul v kroucení	W_t :	1,6e6	1,6e6	1,6e6	1,6e6	[mm ³]	
napětí ve smyku od kroucení	$\tau_{tor,d}$:	0,00	0,00	0,00	0,66	[MPa]	
souč. závislý na tvaru průř.	k_{shape} :	1,43	1,43	1,43	1,43	[-]	
	$k_{shape} \cdot \tau_{tor,d} =$	0,00	0,00	0,00	0,95	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	2,16	2,16	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	0,00	0,00	0,00	43,88	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tahu (EN 5 - 6.2.3):

$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,80	0,41	0,98	0,42	[-]	
$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,74	0,29	0,72	0,45	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	79,59	40,82	97,94	42,17	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	73,86	28,57	72,33	45,04	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,20	0,64	0,90	0,44	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,15	0,52	0,65	0,46	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	20,36	64,03	90,44	43,63	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	14,63	51,78	64,83	46,50	[%]	Vyhovuje

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y	λ_y :	22,60	22,60	22,60	22,60	[-]	
štíhlost k ose z	λ_z :	0,00	0,00	0,00	0,00	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,38	0,38	0,38	0,38	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	0,00	0,00	0,00	0,00	[-]	
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	0,1	0,1	0,1	[-]	
	k_y :	0,57	0,57	0,57	0,57	[-]	
	k_z :	0,49	0,49	0,49	0,49	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,99	0,99	0,99	0,99	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	1,03	1,03	1,03	1,03	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,20	0,89	0,90	0,54	[-]	

$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,15	0,75	0,65	0,57	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	20,36	89,42	90,44	54,36	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	14,63	75,30	64,83	56,75	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a tlaku s vlivem stability (EN 5 - 6.3.2):

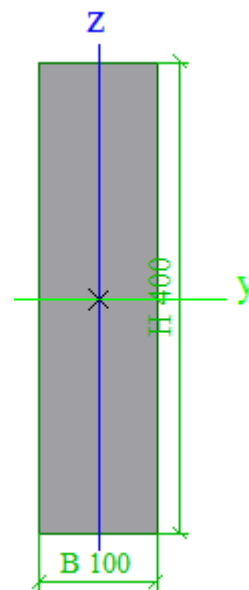
poměr účinné délky dle tab. 6.1	l_{ef}/l :	1,00	1,00	1,00	1,00	[-]	
úč. délka nosníku závislá na BC a zat.	l_{ef} :	3800	800	800	800	[mm]	
kritické nap. v ohybu	$\sigma_{m,crit}$:	88,51	420,42	420,42	420,42	[MPa]	
pom. štíhlost v ohybu	$\lambda_{rel,m}$:	0,52	0,24	0,24	0,24	[-]	
souč. klopení	k_{crit} :	1,00	1,00	1,00	1,00	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} =$		0,04	0,63	0,78	0,16	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	3,93	63,39	78,05	16,08	[%]	Vyhovuje

6.5.2 Průběžné prvky trojúhelníkových segmentů

Každý trojúhelníkový segment je složen ze dvou diagonál a jednoho průběžného prvku průřezu 100/400 mm. Prvky jsou průběžné přes celý podélný směr stavby. Stejně jako diagonálám, je i průběžným prvkům bráněno ve vybočení kolmo na osu z, střešním pláštěm. Vzpěrná délka pro vybočení kolmo k ose y je 3 m.

Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b:	100	[mm]
výška průř. h:	400	[mm]
plocha průř. A:	40000	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	5,3E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	3,3E+07	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	2666667	[mm ³]
modul průř. W_z :	666667	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	2000000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	500000	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	115,5	[mm]
polom. setrvač. i_z :	28,9	[mm]

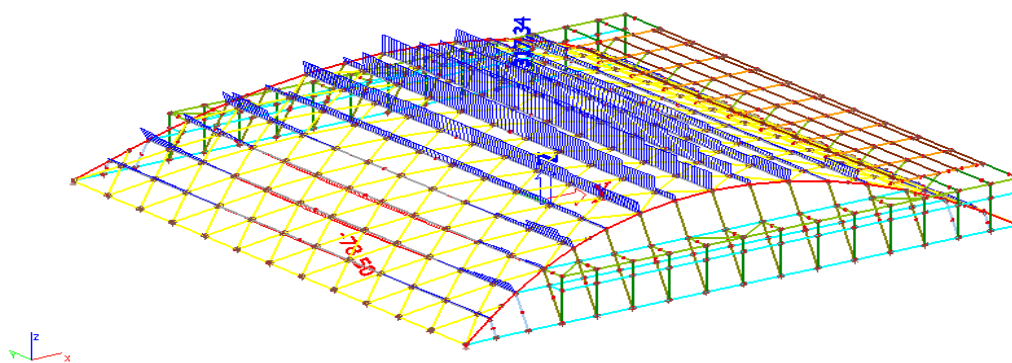


Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B1016	100/400 - OBDEL	1,125	NC1	-78,50	-0,11	-0,03	0,01	3,66	-0,04
B335	100/400 - OBDEL	0,375	NC1	317,34	0,02	0,12	0,00	-4,42	0,02
B39	100/400 - OBDEL	4,129	NC1	25,66	-1,07	-1,06	-0,30	0,00	0,00
B51	100/400 - OBDEL	0,000	NC1	42,84	1,35	8,52	0,35	0,00	0,00
B959	100/400 - OBDEL	1,074	NC1	119,24	0,39	-26,31	0,26	0,00	0,00
B903	100/400 - OBDEL	0,000	NC1	154,10	-0,38	33,11	-0,26	0,00	0,00
B245	100/400 - OBDEL	2,229	NC1	32,53	-0,15	7,11	-0,38	16,12	-0,32
B235	100/400 - OBDEL	0,000	NC1	16,54	0,20	-4,23	0,38	9,80	-0,39
B330	100/400 - OBDEL	0,000	NC1	186,58	0,01	5,08	-0,04	-14,75	-0,04
B150	100/400 - OBDEL	3,005	NC1	4,28	0,07	12,26	-0,04	37,53	0,23
B39	100/400 - OBDEL	3,000	NC1	28,30	-0,53	-8,14	-0,32	-6,64	-0,59
B51	100/400 - OBDEL	1,128	NC1	42,83	1,29	8,38	0,37	9,51	1,44

Pro vybrané prvky je rozhodující tah v kombinaci s ohybem. Postup posouzení na kombinaci vzpěru a ohybu, kombinaci tahu a ohybu, kombinaci vzpěru a ztráty příčné a torzní stability, na posouzení smyku a torzního namáhání je naznačen výše (viz vzorce (10), (11), (12), (13) a (15)). Průběh návrhových normálových sil na průřezu je graficky zobrazen na obr. 60:



Obr. 60 Průběh normálových sil na průběžných prvcích segmentů.

Návrhové síly pro posouzení 4 stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle normových vztahů:

Veličina	Sym.	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 4	Jedn.	Pozn.
		$N + \max$	$N - \max$	$M_y \max$	$V_y \max$ $M_z \max$		
N_{Ed} :		317,34	-78,50	10,00	42,83	[kN]	
$V_{Ed,y}$:		0,00	0,00	16,50	33,11	[kN]	
$V_{Ed,z}$:		0,00	0,00	1,47	1,35	[kN]	
$M_{Ed,y}$:		4,42	6,00	37,53	9,51	[kNm]	
$M_{Ed,z}$:		0,02	0,70	1,20	1,44	[kNm]	
T_{Ed} :		0,00	0,00	0,00	0,38	[kNm]	
Únosnost v tahu rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.2):							
tahové \parallel napětí	$\sigma_{t,0,d}$:	7,93	0,00	0,25	1,07	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{t,0,d}$:	11,62	11,62	11,62	11,62	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	68,30	0,00	2,15	9,22	[%]	Vyhovuje
Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):							
tlakové \parallel napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	0,00	1,96	0,00	0,00	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	15,36	15,36	15,36	15,36	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	0,00	12,78	0,00	0,00	[%]	Vyhovuje
Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):							
šířka průřezu prvku y-y	b_y :	100	100	100	100	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	400	400	400	400	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	0,67	0,67	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	67	67	67	67	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	268	268	268	268	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,00	0,00	0,92	1,85	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,00	0,00	0,08	0,08	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,24	2,24	2,24	2,24	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	0,00	0,00	41,23	82,73	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	0,00	0,00	3,67	3,37	[%]	Vyhovuje
Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):							
napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	1,66	2,25	14,07	3,57	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	0,03	1,05	1,80	2,16	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vliv nehom.	k_m :	0,7	0,7	0,7	0,7	[-]	
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d}$:	16,00	16,00	16,00	16,00	[MPa]	

$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,10	0,19	0,96	0,32	[-]	
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,07	0,16	0,73	0,29	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ℑ:	10,49	18,66	95,86	31,75	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ℑ:	7,44	16,41	72,84	29,11	[%]	Vyhovuje

Torzní namáhání (EN 5 - 6.1.8):

souč. závislý na poměru h/b	β:	0,208	0,208	0,208	0,208	[-]	
průř. modul v kroucení	W_t :	8,3E+5	8,3E+5	8,3E+5	8,3E+5	[mm ³]	
napětí ve smyku od kroucení	$\tau_{tor,d}$:	0,00	0,00	0,00	0,46	[MPa]	
souč. závislý na tvaru průř.	k_{shape} :	1,60	1,60	1,60	1,60	[-]	
	$k_{shape} \cdot \tau_{tor,d} =$	0,00	0,00	0,00	0,73	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,24	2,24	2,24	2,24	[MPa]	
využití průřezu	ℑ:	0,00	0,00	0,00	32,62	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tahu (EN 5 - 6.2.3):

$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,79	0,19	0,98	0,41	[-]	
$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,76	0,16	0,75	0,38	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ℑ:	78,79	18,66	98,01	40,97	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ℑ:	75,74	16,41	74,99	38,33	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,10	0,20	0,96	0,32	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,07	0,18	0,73	0,29	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ℑ:	10,49	20,29	95,86	31,75	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ℑ:	7,44	18,04	72,84	29,11	[%]	Vyhovuje

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y	λ_y :	25,98	25,98	25,98	25,98	[-]	
štíhlost k ose z	λ_z :	0,00	0,00	0,00	0,00	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,43	0,43	0,43	0,43	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	0,00	0,00	0,00	0,00	[-]	

souč. pro prvky splňující meze zakřív.	β_c :	0,1	0,1	0,1	0,1	[-]	
	k_y :	0,60	0,60	0,60	0,60	[-]	
	k_z :	0,49	0,49	0,49	0,49	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,98	0,98	0,98	0,98	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	1,03	1,03	1,03	1,03	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,10	0,32	0,96	0,32	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,07	0,29	0,73	0,29	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ϱ :	10,49	31,64	95,86	31,75	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ϱ :	7,44	28,80	72,84	29,11	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a tlaku s vlivem stability (EN 5 - 6.3.2):

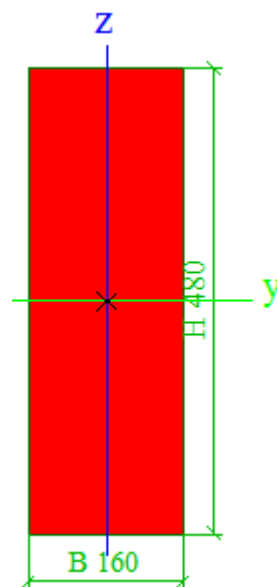
poměr účinné délky dle tab. 6.1	l_{ef}/l :	1,00	1,00	1,00	1,00	[-]	
úč. délka nosníku závislá na BC a zat.	l_{ef} :	3800	3800	3800	3800	[mm]	
kritické nap. v ohybu	$\sigma_{m,crit}$:	45,16	45,16	45,16	45,16	[MPa]	
pom. štíhlost v ohybu	$\lambda_{rel,m}$:	0,73	0,73	0,73	0,73	[-]	
souč. klopení	k_{crit} :	1,00	1,00	1,00	1,00	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} =$		0,01	0,14	0,77	0,05	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ϱ :	1,07	14,37	77,41	4,97	[%]	Vyhovuje

6.5.3 Krajiní obloukové nosníky

Předešlé průběžné prvky jsou ukládány na krajiní obloukové nosníky, které jsou ukloněné od svislé roviny přibližně o 20°. Průřez těchto nosníků je 160/480 mm. Obloukové nosníky mají rozpětí 36,9 m a vzepětí 5,7 m. Prvkům je bráněno ve vybočení kolmo ke směru obou os sloupky a průběžnými, podélnými prvky. Nejdelší vzpěrná délka je 2,5 m.

Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b:	160	[mm]
výška průř. h:	480	[mm]
plocha průř. A:	76800	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	1,5E+09	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	1,6E+08	[mm ⁴]



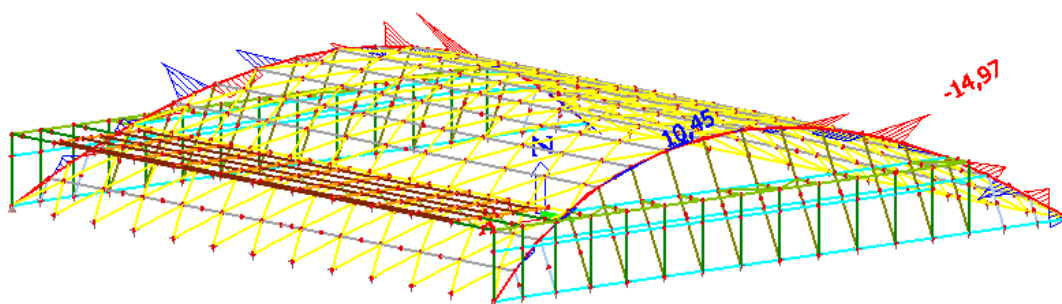
modul průř. W_y : 6144000 [mm³]
 modul průř. W_z : 2048000 [mm³]
 stat. mom. ke středu průř. S_y : 4608000 [mm³]
 stat. mom. ke středu průř. S_z : 1536000 [mm³]
 polom. setrvač. i_y : 138,6 [mm]
 polom. setrvač. i_z : 46,2 [mm]

Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B865	160/480 - OBDEL	1,251	NC1	-426,42	-3,50	4,52	-0,66	-4,31	1,75
B713	160/480 - OBDEL	2,540	NC1	579,40	2,38	5,39	-1,53	6,38	0,54
B852	160/480 - OBDEL	1,255	NC1	212,85	-15,81	3,40	-2,06	2,92	-14,49
B1036	160/480 - OBDEL	0,000	NC1	216,71	16,18	-5,10	2,13	4,28	-14,97
B877	160/480 - OBDEL	2,503	NC1	-277,31	-4,44	-7,28	-0,58	-14,82	-8,46
B821	160/480 - OBDEL	0,000	NC1	206,83	-0,49	7,18	2,53	-3,03	4,39
B863	160/480 - OBDEL	0,000	NC1	211,44	0,51	-5,79	-2,47	13,33	3,27
B821	160/480 - OBDEL	2,509	NC1	213,75	-0,60	6,40	2,54	13,88	3,04
B1037	160/480 - OBDEL	0,000	NC1	-283,14	-11,61	-2,70	-0,77	1,37	10,45

Pro vybrané prvky je rozhodující opět tah v kombinaci s ohybem. Postup posouzení na kombinaci vzpěru a ohybu, kombinaci tahu a ohybu, kombinaci vzpěru a ztráty příčné a torzní stability, na posouzení smyku a torzního namáhání je naznačen výše (viz vzorce (10), (11), (12), (13) a (15)). Průběh návrhových ohybových momentů ve směru k lokální ose z, je graficky zobrazen na obr. 61 a 62:



Obr. 61 Průběh ohybových momentů k lokální ose z, na ukloněných krajních obloucích.

Návrhové síly pro posouzení 4 stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle normových vztahů:

Veličina	Sym.	Průř. 1 + max N	Pr. 2 - max N	Pr. 3 max My	Pr. 4 max My	Jedn.	Pozn.
N_{Ed} :		579,4	-426,4	-277,3	217,0	[kN]	
$V_{Ed,y}$:		0,00	0,00	0,00	7,28	[kN]	
$V_{Ed,z}$:		0,00	0,00	0,00	16,18	[kN]	
$M_{Ed,y}$:		7,00	4,31	14,82	0,00	[kNm]	
$M_{Ed,z}$:		1,00	2,00	14,97	0,00	[kNm]	
T_{Ed} :		0,00	0,00	0,00	2,54	[kNm]	

Únosnost v tahu rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.2):

tahové napětí	$\sigma_{t,0,d}$:	7,54	0,00	0,00	2,83	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{t,0,d}$:	11,18	11,18	11,18	11,18	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	67,48	0,00	0,00	25,27	[%]	Vyhovuje

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	0,00	5,55	3,61	0,00	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	14,78	14,78	14,78	14,78	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	0,00	37,56	24,42	0,00	[%]	Vyhovuje

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	1,14	0,70	2,41	0,00	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	0,49	0,98	7,31	0,00	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vliv nehom.	k_m :	0,7	0,7	0,7	0,7	[-]	
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d}$:	15,12	15,12	15,12	15,12	[MPa]	
$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,10	0,09	0,50	0,00	[-]	
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,09	0,10	0,60	0,00	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	9,80	9,16	49,80	0,00	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	8,51	9,71	59,52	0,00	[%]	Vyhovuje

Torzní namáhání (EN 5 - 6.1.8):

souč. závislý na poměru h/b	β :	0,208	0,208	0,208	0,208	[-]	
průř. modul v kroucení	W_t :	2,5E+6	2E+6	2,5E+6	2E+6	[mm ³]	
napětí ve smyku od kroucení	$\tau_{tor,d}$:	0,00	0,00	0,00	0,99	[MPa]	
souč. závislý na tvaru průř.	k_{shape} :	1,45	1,45	1,45	1,45	[-]	
$k_{shape} \cdot \tau_{tor,d} =$		0,00	0,00	0,00	1,44	[MPa]	

návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,16	2,16	2,16	2,16	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	0,00	0,00	0,00	66,84	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tahu (EN 5 - 6.2.3):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,77 \quad 0,09 \quad 0,50 \quad 0,25 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,76 \quad 0,10 \quad 0,60 \quad 0,25 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	77,27	9,16	49,80	25,27	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	75,98	9,71	59,52	25,27	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,10 \quad 0,23 \quad 0,56 \quad 0,00 \quad [-]$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,09 \quad 0,24 \quad 0,65 \quad 0,00 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	9,80	23,27	55,77	0,00	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	8,51	23,81	65,49	0,00	[%]	Vyhovuje

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y	λ_y :	18,04	18,04	18,04	18,04	[-]	
štíhlost k ose z	λ_z :	0,00	0,00	0,00	0,00	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,30	0,30	0,30	0,30	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	0,00	0,00	0,00	0,00	[-]	
souč. pro prvky splňující meze zakřív.	β_c :	0,1	0,1	0,1	0,1	[-]	
	k_y :	0,54	0,54	0,54	0,54	[-]	
	k_z :	0,49	0,49	0,49	0,49	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	1,00	1,00	1,00	1,00	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	1,03	1,03	1,03	1,03	[-]	

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,10 \quad 0,47 \quad 0,74 \quad 0,00 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,09 \quad 0,46 \quad 0,83 \quad 0,00 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	9,80	23,27	55,77	0,00	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	8,51	23,81	65,49	0,00	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a tlaku s vlivem stability (EN 5 - 6.3.2):

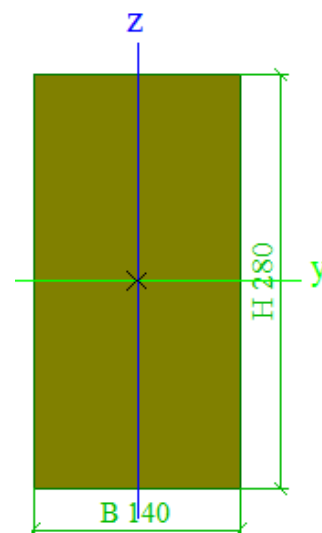
poměr účinné délky dle tab. 6.1	l_{ef}/l :	1,00	1,00	1,00	1,00	[-]
úč. délka nosníku závislá na BC a zat.	l_{ef} :	3460	3460	3460	3460	[mm]
kritické nap. v ohybu	$\sigma_{m,crit}$:	105,80	105,8	105,80	105,8	[MPa]
			0		0	
pom. štíhlost v ohybu	$\lambda_{rel,m}$:	0,48	0,48	0,48	0,48	[-]
souč. klopení	k_{crit} :	1,00	1,00	1,00	1,00	[-]
$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} =$		0,01	0,37	0,26	0,00	[-]
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	\mathcal{G} :	0,57	36,65	26,24	0,00	[%] Vyhovuje

6.5.4 Sloupy podpírající boční přístavek

Na čelních stěnách stavby se nacházejí sloupy podpírající krajní přístavky a obloukové nosníky. Sloupy jsou průřezu 140/280 mm, délka nejdelšího sloupu je přibližně 6,3 m. Prvkům je bráněno ve vybočení kolmo ke směru obou os pruty přístavků. Nejdelší vzpěrná délka je 2,8 m.

Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b:	140	[mm]
výška průř. h:	280	[mm]
plocha průř. A:	39200	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	2,6E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	6,4E+07	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	1829333	[mm ³]
modul průř. W_z :	914667	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	1372000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	686000	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	80,8	[mm]
polom. setrvač. i_z :	40,4	[mm]

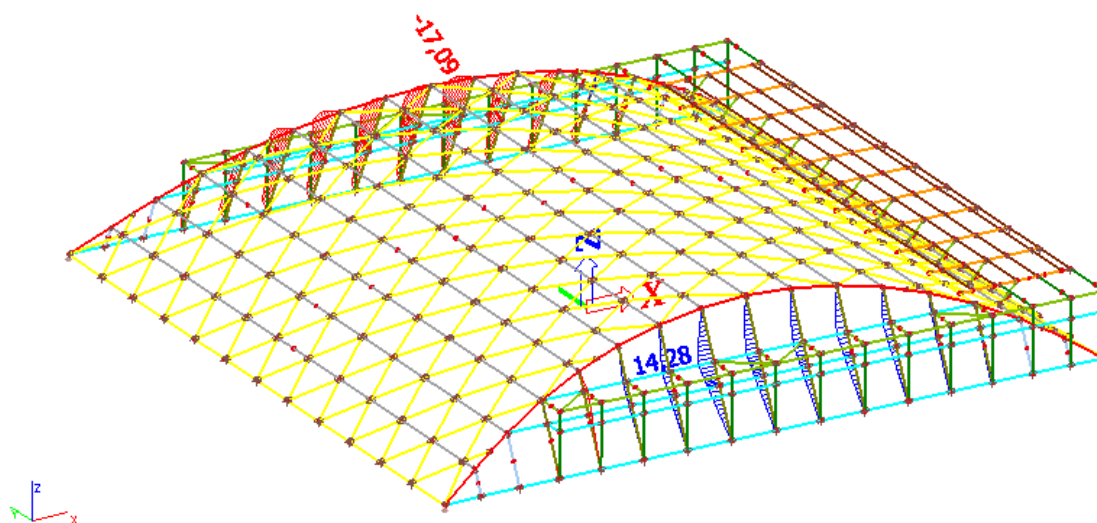


Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B716	140/280 - OBDEL	1,393	NC1	-94,11	0,47	-1,51	-0,27	-4,42	-0,35
B973	140/280 - OBDEL	0,703	NC1	92,18	0,02	5,04	-0,03	3,87	0,01
B742	140/280 - OBDEL	1,188	NC1	-72,80	-1,03	0,02	0,20	0,10	0,64
B715	140/280 - OBDEL	0,850	NC1	-92,97	1,14	-1,53	-0,27	-6,46	0,70
B934	140/280 - OBDEL	0,794	NC1	41,20	0,25	-3,90	0,03	-17,06	0,11
B12	140/280 - OBDEL	1,769	NC1	-7,19	0,08	11,50	-0,01	0,00	0,00
B200	140/280 - OBDEL	1,189	NC1	-86,04	-0,16	5,28	-0,32	0,00	0,00
B847	140/280 - OBDEL	0,247	NC1	-49,02	-0,28	-3,60	0,25	-0,89	-0,07
B88	140/280 - OBDEL	0,000	NC1	50,27	-0,03	2,17	0,01	-17,09	0,08
B972	140/280 - OBDEL	2,673	NC1	49,38	0,03	3,43	-0,04	14,28	0,07
B716	140/280 - OBDEL	0,464	NC1	-92,42	0,05	-1,37	-0,27	-3,05	-0,60

I zde je pro vybrané prvky rozhodující tah v kombinaci s ohybem. Postup posouzení na kombinaci vzpěru a ohybu, kombinaci tahu a ohybu, kombinaci vzpěru a ztráty příčné a torzní stability, na posouzení smyku a torzního namáhání je naznačen výše (viz vzorce (10), (11), (12), (13) a (15)). Průběh návrhových ohybových momentů je graficky zobrazen na obr. 62:



Obr. 62 Průběh ohybových momentů na sloupech.

Návrhové síly pro posouzení 4 stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle normových vztahů:

Veličina	Symb.	Průř. 1	Průř. 2	Průř. 3	Průř. 4	Jedn.	Pozn.
		$N + \max$	$N - \max$	$M_y \max$	$M_y \max$ $M_z \max$		
N_{Ed} :		92,18	-94,11	50,27	-15,00	[kN]	
$V_{Ed,y}$:		5,04	1,15	2,17	11,50	[kN]	
$V_{Ed,z}$:		0,02	0,47	0,03	1,14	[kN]	
$M_{Ed,y}$:		3,87	4,42	17,09	0,00	[kNm]	
$M_{Ed,z}$:		0,01	0,35	0,70	0,00	[kNm]	
T_{Ed} :		0,03	0,27	0,32	0,32	[kNm]	

Únosnost v tahu rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.2):

tahové \parallel napětí	$\sigma_{t,0,d}$:	2,35	0,00	1,28	0,00	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{t,0,d}$:	11,62	11,62	11,62	11,62	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	20,24	0,00	11,04	0,00	[%]	Vyhovuje

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové \parallel napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	0,00	2,40	0,00	0,38	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	15,36	15,36	15,36	15,36	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	0,00	15,63	0,00	2,49	[%]	Vyhovuje

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y	b_y :	140	140	140	140	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	280	280	280	280	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	0,67	0,67	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	94	94	94	94	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	188	188	188	188	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,29	0,07	0,12	0,66	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,00	0,03	0,00	0,07	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,24	2,24	2,24	2,24	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	12,85	2,93	5,53	29,32	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	0,05	1,20	0,08	2,91	[%]	Vyhovuje

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	2,12	2,42	9,34	0,00	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	0,01	0,38	0,77	0,00	[MPa]	

souč. redistrib. nap. a vliv nehom. k_m : 0,7 0,7 0,7 0,7 [-]

návrh. pevnost v ohybu $f_{m,d}$: 16,58 16,58 16,58 16,58 [MPa]

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,13 \quad 0,16 \quad 0,60 \quad 0,00 \quad [-]$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,09 \quad 0,13 \quad 0,44 \quad 0,00 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) ρ : **12,81** **16,19** **59,59** **0,00** [%] **Vyhovuje**

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$) ρ : **9,00** **12,51** **44,07** **0,00** [%] **Vyhovuje**

Kombinace ohybu a osového tahu (EN 5 - 6.2.3):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,33 \quad 0,16 \quad 0,71 \quad 0,00 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,29 \quad 0,13 \quad 0,55 \quad 0,00 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) ρ : 33,05 16,19 70,63 0,00 [%] Vyhovuje

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$) ρ : **29,24** **12,51** **55,11** **0,00** [%] **Vyhovuje**

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,13 \quad 0,19 \quad 0,60 \quad 0,00 \quad [-]$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,09 \quad 0,15 \quad 0,44 \quad 0,00 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) ρ : **12,81** **18,63** **59,59** **0,06** [%] **Vyhovuje**

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$) ρ : **9,00** **14,95** **44,07** **0,06** [%] **Vyhovuje**

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y λ_y : 34,64 34,64 34,64 34,64 [-]

štíhlost k ose z λ_z : 69,28 69,28 69,28 69,28 [-]

pom. štíhlost prvku (směr y-y) $\lambda_{rel,y}$: 0,58 0,58 0,58 0,58 [-]

pom. štíhlost prvku (směr z-z) $\lambda_{rel,z}$: 1,15 1,15 1,15 1,15 [-]

souč. pro prvky splňující meze zakřiv. β_c : 0,1 0,1 0,1 0,1 [-]

k_y : 0,68 0,68 0,68 0,68 [-]

k_z : 1,21 1,21 1,21 1,21 [-]

souč. vzpěrnosti (y-y) $k_{c,y}$: 0,96 0,96 0,96 0,96 [-]

souč. vzpěrnosti (y-y) $k_{c,z}$: 0,64 0,64 0,64 0,64 [-]

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,13 \quad 0,32 \quad 0,60 \quad 0,03 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,09 \quad 0,37 \quad 0,44 \quad 0,04 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) ϱ : **12,81 32,45 59,59 2,59** [%] **Vyhovuje**

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$) ϱ : **9,00 36,94 44,07 3,89** [%] **Vyhovuje**

Kombinace ohybu a tlaku s vlivem stability (EN 5 - 6.3.2):

poměr účinné délky dle tab. 6.1 l_{ef}/l : 1,00 1,00 1,00 1,00 [-]

úč. délka nosníku závislá na BC a zat. l_{ef} : 6860 6860 6860 6860 [mm]

kritické nap. v ohybu $\sigma_{m,crit}$: 70,04 70,04 70,04 70,04 [MPa]

pom. štíhlost v ohybu $\lambda_{rel,m}$: 0,59 0,59 0,59 0,59 [-]

souč. klopení k_{crit} : 1,00 1,00 1,00 1,00 [-]

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} = 0,02 \quad 0,27 \quad 0,32 \quad 0,04 \quad [-]$$

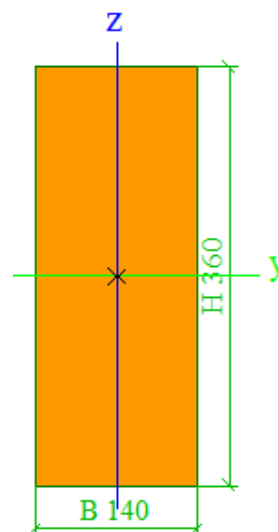
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) ϱ : **1,63 26,55 31,76 3,89** [%] **Vyhovuje**

6.5.5 Příčné vodorovné prvky nadstavby

Součástí konstrukce přístavku na straně přilehlé budovy jsou příčné vodorovné nosníky s průřezem 140/360 mm. Nosníky se chovají přibližně jako spojitý nosník o dvou polích, blízko středu rozpětí jsou podpírány vzpěrami uchycenými k hlavní nosné konstrukci. Délka těchto nosníků je 5,7 m. Prvkům je bráněno ve vybočení kolmo ke směru osy z, střešním pláštěm. Vzpěrná délka zohledňující vybočení kolmo na osu y je 3,3 m.

Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b:	140	[mm]
výška průř. h:	360	[mm]
plocha průř. A:	50400	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	5,4E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	8,2E+07	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	3024000	[mm ³]
modul průř. W_z :	1176000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	2268000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	882000	[mm ³]



polom. setrvač. i_y : 103,9 [mm]

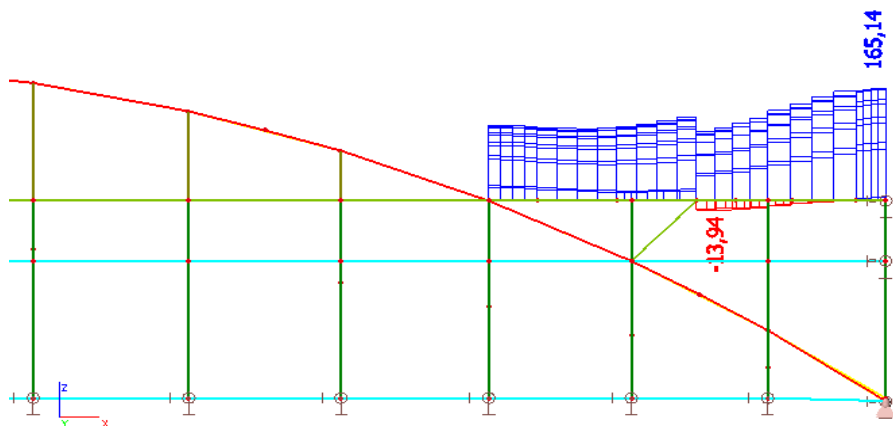
polom. setrvač. i_z : 40,4 [mm]

Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B729	140/360 - OBDEL	0,838	NC1	-13,94	-0,17	-9,49	-0,01	7,08	0,79
B745	140/360 - OBDEL	0,000	NC1	165,14	0,58	21,64	0,00	0,00	0,00
B13	140/360 - OBDEL	0,000	NC1	14,70	-4,06	2,29	0,33	18,71	2,00
B757	140/360 - OBDEL	0,000	NC1	1,67	0,82	8,36	0,20	6,21	0,15
B772	140/360 - OBDEL	0,765	NC1	110,81	-0,57	-23,14	-0,01	0,00	0,00
B791	140/360 - OBDEL	0,768	NC1	13,09	0,10	12,17	-0,06	13,60	0,97
B786	140/360 - OBDEL	0,312	NC1	14,98	-1,06	-4,77	0,34	17,81	0,74
B787	140/360 - OBDEL	0,765	NC1	21,94	0,42	-16,68	0,31	0,00	0,00
B770	140/360 - OBDEL	1,250	NC1	109,28	-0,06	3,70	0,00	26,29	0,91
B787	140/360 - OBDEL	0,000	NC1	20,22	0,40	-13,41	0,31	11,47	-0,26

Postup posouzení na kombinaci vzpěru a ohybu, kombinaci tahu a ohybu, kombinaci vzpěru a ztráty příčné a torzní stability, na posouzení smyku a torzního namáhání je naznačen výše (viz vzorce (10), (11), (12), (13) a (15)). Průběh návrhových normálových sil je graficky zobrazen na obr. 63:



Obr. 63 Průběh návrhových normálových sil na příčných prvcích konstrukce nadstavby.

Návrhové síly pro posouzení 4 stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle normových vztahů:

Veličina	Symb.	Průř. 1	Pr. 2	Průř. 3	Průř. 4	Jedn.	Pozn.
		$N + \max$	$N - \max$	$M_y \max$	$M_z \max$		
N_{Ed} :		165,14	-13,94	109,2	165,14	[kN]	
$V_{Ed,y}$:		0,00	0,00	0,00	23,14	[kN]	
$V_{Ed,z}$:		0,00	0,00	0,00	4,06	[kN]	
$M_{Ed,y}$:		10,00	7,08	26,29	18,71	[kNm]	
$M_{Ed,z}$:		1,00	0,79	0,91	2,00	[kNm]	
T_{Ed} :		0,00	0,00	0,00	0,34	[kNm]	

Únosnost v tahu rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.2):

tahové \parallel napětí	$\sigma_{t,0,d}$:	3,28	0,00	2,17	3,28	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{t,0,d}$:	11,62	11,62	11,62	11,62	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	28,21	0,00	18,67	28,21	[%]	Vyhovuje

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové \parallel napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	0,00	0,28	0,00	0,00	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	15,36	15,36	15,36	15,36	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	0,00	1,80	0,00	0,00	[%]	Vyhovuje

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y	b_y :	140	140	140	140	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	360	360	360	360	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	0,67	0,67	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y}$:	94	94	94	94	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z}$:	241	241	241	241	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y}$:	0,00	0,00	0,00	1,03	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z}$:	0,00	0,00	0,00	0,18	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d}$:	2,24	2,24	2,24	2,24	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	0,00	0,00	0,00	45,89	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	0,00	0,00	0,00	8,05	[%]	Vyhovuje

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d}$:	3,31	2,34	8,69	6,19	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d}$:	0,85	0,67	0,77	1,70	[MPa]	

souč. redistrib. nap. a vliv nehom. k_m : 0,7 0,7 0,7 0,7 [-]

návrh. pevnost v ohybu $f_{m,d}$: 16,17 16,17 16,17 16,17 [MPa]

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,24 \quad 0,17 \quad 0,57 \quad 0,46 \quad [-]$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,20 \quad 0,14 \quad 0,42 \quad 0,37 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) ρ : **24,14** **17,39** **57,13** **45,64** [%] **Vyhovuje**

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$) ρ : **19,58** **14,29** **42,43** **37,31** [%] **Vyhovuje**

Kombinace ohybu a osového tahu (EN 5 - 6.2.3):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,52 \quad 0,17 \quad 0,76 \quad 0,74 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,48 \quad 0,14 \quad 0,61 \quad 0,66 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) ρ : **52,35** **17,39** **75,80** **73,85** [%] **Vyhovuje**

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$) ρ : **47,79** **14,29** **61,10** **65,52** [%] **Vyhovuje**

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,24 \quad 0,17 \quad 0,57 \quad 0,46 \quad [-]$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,20 \quad 0,14 \quad 0,42 \quad 0,37 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$) ρ : **24,14** **17,42** **57,13** **45,64** [%] **Vyhovuje**

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$) ρ : **19,58** **14,33** **42,43** **37,31** [%] **Vyhovuje**

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y λ_y : 31,75 31,75 31,75 31,75 [-]

štíhlost k ose z λ_z : 0,00 0,00 0,00 0,00 [-]

pom. štíhlost prvku (směr y-y) $\lambda_{rel,y}$: 0,53 0,53 0,53 0,53 [-]

pom. štíhlost prvku (směr z-z) $\lambda_{rel,z}$: 0,00 0,00 0,00 0,00 [-]

souč. pro prvky splňující meze zakřiv. β_c : 0,1 0,1 0,1 0,1 [-]

k_y : 0,65 0,65 0,65 0,65 [-]

k_z : 0,49 0,49 0,49 0,49 [-]

souč. vzpěrnosti (y-y) $k_{c,y}$: 0,97 0,97 0,97 0,97 [-]

souč. vzpěrnosti (y-y) $k_{c,z}$: 1,03 1,03 1,03 1,03 [-]

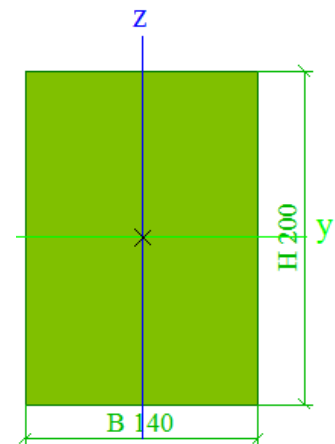
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$	0,24	0,19	0,57	0,46	[-]	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$	0,20	0,16	0,42	0,37	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	g:	24,14	19,25	57,13	45,64 [%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	g:	19,58	16,04	42,43	37,31 [%]	Vyhovuje

6.5.6 Vzpěry podpírající konstrukci nadstavby

Funkce vzpěr spočívá v přenosu zatížení z nadstavby do hlavní nosné klenbové konstrukce. Pro vzpěry je zvolen průřez 140/200 mm. Vzpěry jsou uloženy na obou koncích kloubově. Délka těchto prvků je přibližně 1,5 m. Prvkům není bráněno ve vybočení kolmo ke směru osy z ani y. Vzpěrná délka pro oba směry vybočení je 1,5 m.

Průřezové charakteristiky spočtené dle vzorců (8) jsou:

šířka průř. b:	140	[mm]
výška průř. h:	200	[mm]
plocha průř. A:	28000	[mm ²]
mom. setrvač. I_y :	9,3E+07	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	4,6E+07	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	933333	[mm ³]
modul průř. W_z :	653333	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	700000	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	490000	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	57,7	[mm]
polom. setrvač. i_z :	40,4	[mm]

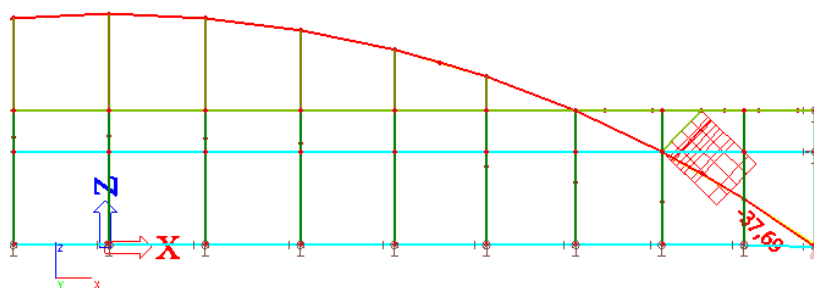


Přehled všech vyskytujících se kritických hodnot vnitřních sil na rozhodujících prvcích je uveden v tabulce generované programem Scia Engineer:

Nelineární kombinace : NC1

Prvek	css	dx [m]	Stav	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
B1014	140/200 - OBDEL	0,000	NC1	-37,69	0,00	0,08	0,01	0,00	0,00
B1009	140/200 - OBDEL	0,370	NC1	-4,71	0,00	0,04	0,00	0,02	0,00
B1004	140/200 - OBDEL	0,740	NC1	-32,17	-0,01	-0,01	0,09	0,03	0,00
B1013	140/200 - OBDEL	0,740	NC1	-22,28	0,01	0,01	-0,04	0,03	0,00
B1004	140/200 - OBDEL	1,480	NC1	-32,11	-0,01	-0,08	0,09	0,00	0,00
B1004	140/200 - OBDEL	1,110	NC1	-32,14	-0,01	-0,04	0,09	0,02	0,00
B1007	140/200 - OBDEL	0,000	NC1	-7,37	0,00	0,07	0,03	0,00	0,00
B1004	140/200 - OBDEL	1,110	NC1	-32,13	-0,01	-0,05	0,09	0,02	0,00

Je zřejmé, že vzpěry jsou namáhány dominantně tlakem. Postup posouzení na tlak s vlivem vzpěru je uveden na vzorcích (11). Průběh návrhových normálových sil je graficky zobrazen na obr. 64:



Obr. 64 Průběh návrhových normálových sil na vzpěrách.

Návrhové síly pro posouzení 4 stavů namáhání průřezu a vypočtené hodnoty mezikroků, součinitelů, namáhání průřezu a využití průřezu podle normových vztahů:

Veličina	Symbol	Průř. 1	Jednotka	Poznámka
N - max	N_{Ed}	-38,00	[kN]	
	$V_{Ed,y}$	0,00	[kN]	
	$V_{Ed,z}$	0,00	[kN]	
	$M_{Ed,y}$	0,03	[kNm]	
	$M_{Ed,z}$	0,00	[kNm]	
	T_{Ed}	0,00	[kNm]	

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové napětí	$\sigma_{c,0,d}$:	1,36	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d}$:	15,36	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	8,84	[%]	Vyhovuje

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y	λ_y :	25,63	[-]	
štíhlost k ose z	λ_z :	36,62	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,43	[-]	
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	0,61	[-]	
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	[-]	
	k_y :	0,60	[-]	
	k_z :	0,70	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,98	[-]	
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	0,95	[-]	

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,09 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,09 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	9,16	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	9,39	[%]	Vyhovuje

6.5.7 Shrnutí

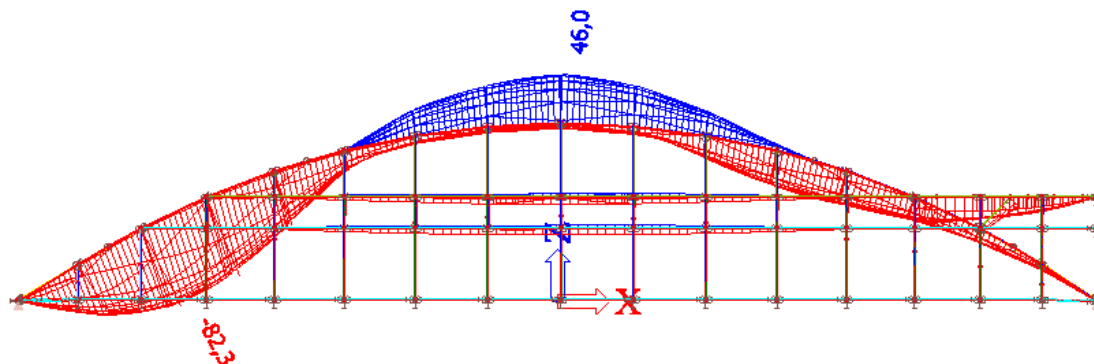
Stejným způsobem proběhlo posouzení zbylých prvků jako vodorovné a svislé prvky bočních přístavků, vodorovné prvky nadstavby umístěné v podélném směru podružné sloupy a další. Všechny navrhované průřezy jsou materiálu GL24h a vyhoví na mezní stav únosnosti.

Seznam navržených průřezů:

• Diagonální prvky	140/400
• Průběžné prvky trojúhelníkových segmentů	100/400
• Ukloněné krajní oblouky	160/480
• Sloupy	140/280
• Vedlejší sloupy	120/280
• Příčné vodorovné prvky nadstavby	140/360
• Vzpěry podpírající nadstavbu	140/200
• Podélné vodorovné prvky nadstavby	100/200
• Hlavní vodorovné prvky přístavků	140/200
• Vedlejší vodorovné prvky přístavků	120/160

6.6 Posouzení mezního stavu použitelnosti

Maximální okamžitý svislý průhyb konstrukce je zobrazen na obrázku 65.



Obr. 65: Okamžitý průhyb konstrukce.

Všechny navržené prvky vyhoví na mezní stav použitelnosti. Podrobný výpočet okamžitého i dlouhodobého přetvoření konstrukce je uveden u zvolené optimální varianty.

7 Srovnání variant a volba optimální

Jako hlavním srovnávacím faktorem byla u všech tří zkoumaných variant sledována spotřeba dřeva, dále byla pozornost zaměřena na velikost volného prostoru pod zastřešením, složitost montáže, dopravy a estetika varianty.

7.1 Spotřeba dřeva

Tabulky 5, 6 a 7 ukazují celkovou délku jednotlivých průřezů společně s jejich hmotností a objemem.

Varianta I

Průřez	Délka	Hmotnost	Objem
[mm]	[m]	[kg]	[m ³]
300/1000	276,5	31519,4	82,9
300/350	80,1	3196,0	8,4
140/360	68,6	1314,0	3,5
180/280	122,3	2343,2	6,2
140/240	117,3	1497,7	3,9
140/200	138,5	1473,6	3,9
120/280	16,2	206,5	0,5
120/160	243,3	1775,3	4,7
100/200	180,0	1368,0	3,6
180/300	522,1	10714,5	28,2

$\Sigma V:$ 145,8 [m³]

Tabulka 5: Výkaz dřeva ve variantě I.

Varianta II

Průřez	Délka	Hmotnost	Objem
[mm]	[m]	[kg]	[m ³]
240/380	382,9	9802,6	25,8
180/200	443,9	6072,5	16,0
150/280	136,0	5043,5	13,3
200/200	309,5	4703,7	12,4
220/320	151,7	4059,3	10,7
220/220	305,8	5624,8	14,8
160/160	12,0	116,7	0,3
120/120	240,0	1313,2	3,5

$\Sigma V:$ 96,7 [m³]

Tabulka 6: Výkaz dřeva ve variantě II.

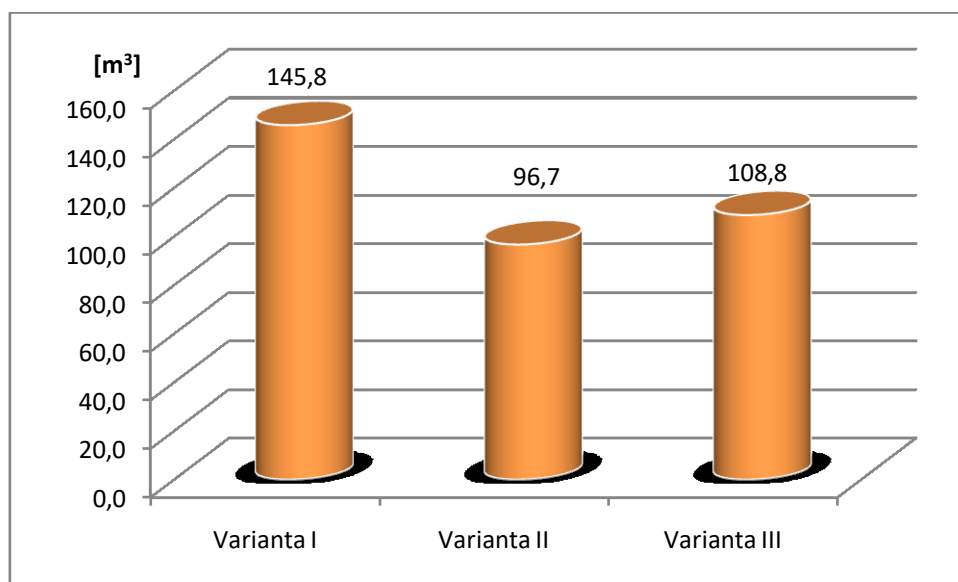
Varianta III

Průřez	Délka	Hmotnost	Objem
[mm]	[m]	[kg]	[m ³]
160/480	80,1	2337,6	6,2
140/400	1066,3	22690,0	59,7
140/360	68,6	1314,0	3,5
140/280	122,3	1822,5	4,8
140/240	117,3	1497,7	3,9
140/200	138,5	1473,6	3,9
120/280	16,2	206,5	0,5
120/160	241,0	1758,3	4,6
100/400	452,7	6880,7	18,1
100/200	180,0	1368,0	3,6

ΣV: 108,8 [m³]

Tabulka 7: Výkaz dřeva ve variantě III.

Graf 1 přehledně ukazuje spotřebu dřeva v jednotlivých variantách, je patrné, že v první variantě (příhradové nosníky) je spotřeba dřeva největší. Druhá a třetí varianta se vzájemně liší ve spotřebě dřeva přibližně o 12 %, přičemž druhá varianta (hlavní nosníky vysoké 1 m) má nejmenší spotřebu.



Graf 1: Srovnání spotřeby dřeva v jednotlivých variantách.

7.2 Volný prostor pod zastřešením

Porovnávána byla výška volného prostoru pod nosnou konstrukcí zastřešení. Uváděná výška je vytyčena spodní hranou nosné konstrukce uprostřed rozpětí a spojnicí bodů ležících

v podporách konstrukce. Varianta I (příhradová konstrukce) má volnou výšku 4,9 m, varianta II (hlavní nosníky výšky 1 m) 5,0 m a varianta III (trojúhelníkové segmenty) 5,8 m.

7.3 Výběr optimální varianty

Spotřeba dřeva je nejmenší u varianty II, nejsou zde ovšem připočteny ocelové prvky navržené jako ztužidla, varianta III má spotřebu dřeva mírně vyšší bez ocelových ztužidel. Z hlediska volného prostoru pod zastřešením je nejvýhodnější varianta III. Pro dopravu a montáž je nejsložitější varianta II, kde je potřeba převážet a pomocí jeřábu zvedat těžké obloukové nosníky.

S uvážením těchto faktorů je pro podrobnější návrh vybrána **varianta III** – skořepina tvořená trojúhelníkovými segmenty.

8 Konstrukce zvolené varianty

Pro zvolenou variantu bylo vypracováno posouzení mezního stavu únosnosti a použitelnosti, posouzení únosnosti spojů v konstrukci a posouzení hlavních nosných prvků na požární odolnost.

8.1 Posouzení mezního stavu únosnosti

Posudek nosných prvků na mezní stav únosnosti byl proveden již v návrhu jednotlivých variant. Všechny prvky konstrukce vyhoví na mezní stav únosnosti.

8.2 Posouzení mezního stavu použitelnosti

V dřevěných konstrukcích je třeba věnovat pozornost přetvoření nosných prvků při působícím zatížení. Norma [4] rozlišuje dvě základní hodnoty deformací. Jsou to okamžité deformace u_{inst} projevující se ihned po působení zatížení a konečné deformace u_{fin} zahrnující vliv dotvarování konstrukce. Mezní hodnoty průhybu nosníků doporučuje norma dle tabulky:

Table 7.2 – Příklady mezních hodnot průhybů nosníků

	W_{inst}	$W_{net,fin}$	W_{fin}
Prostý nosník	#300 až #500	#250 až #350	#150 až #300
Vykonzolované nosníky	#150 až #250	#125 až #175	#75 až #150

Tabulka 8: Doporučené mezní hodnoty průhybů dle [4].

Okamžitý průhyb je určen z charakteristické kombinace zatížení, jejíž předpis stanovuje norma [1]:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (21)$$

Pro stanovení finálního průhybu je zapotřebí vypočítat hodnoty průhybů z kvazistálé kombinace, která je určena vztahem:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 2} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (22)$$

Dle normy je součinitel ψ_2 pro kvazistálou kombinaci zatížení pro střechy (kategorie H), zatížení sněhem (pro stavby v nadmořské výšce pod 1000 m. n. m) a pro zatížení větrem roven 0. Hodnota součinitele ψ_0 je 0 pro střechy (kategorie H), 0,5 pro zatížení sněhem a 0,6 pro zatížení větrem.

Vzorce (23) určují postup stanovení finálních deformací prvků na konstrukci:

$$\begin{aligned}
u_{fin} &= u_{fin,G} + u_{fin,Q1} + u_{fin,Qi}, \\
u_{fin,G} &= u_{inst,G}(1 + k_{def}), \\
u_{fin,Q1} &= u_{inst,Q1}(1 + \psi_{2,1}k_{def}), \\
u_{fin,Qi} &= u_{inst,Qi}(\psi_{0,i} + \psi_{2,i}k_{def}),
\end{aligned} \tag{23}$$

kde $u_{fin,G}$, $u_{fin,Q1}$, $u_{fin,Qi}$ jsou okamžité deformace stanovené z kvazistálé kombinace zatížení.

Jelikož jsou hodnoty součinitele ψ_2 pro danou konstrukci nulové a hodnoty součinitele ψ_0 nejsou větší než 0,6, je možno stanovit konečný průhyb konzervativně dle vzorce:

$$u_{fin} = u_{inst}(1 + k_{def}). \tag{24}$$

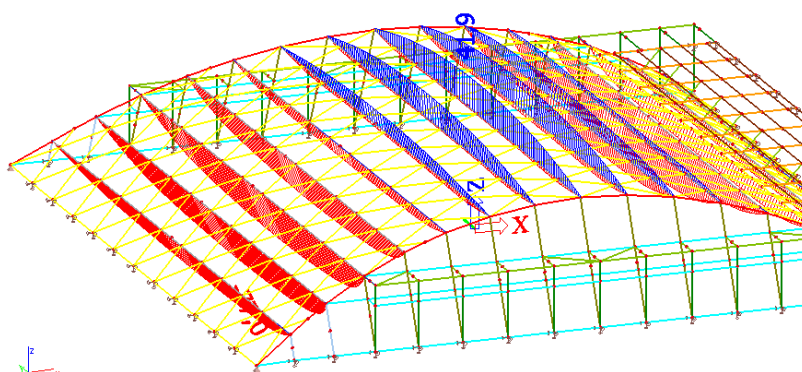
8.3 Diagonály trojúhelníkových segmentů

U diagonálních prvků je sledována svislá deformace mezi styčníky na koncích prvků. Nejkritičtější hodnoty vypočtené na základě vzorců (21), (22) a (24) jsou:

okamžitý průhyb	$w_{inst,char} =$	9,50	[mm]	
délka rozpětí	$L =$	2950	[mm]	
limitní hodnota okamž. průhybu	$w_{lim} = L/300 =$	9,83	[mm]	
využití	$\varrho =$	96,61	[%]	Vyhovuje
konečný průhyb po dotvarování:	$w_{inst,kvaz} =$	2,30	[mm]	
délka rozpětí	$L =$	2950	[mm]	
$w_{fin} = w_{inst,G}(1+k_{def}) + w_{inst,Q1}(1+\psi_{2,1}k_{def}) + w_{inst,Qi}(\psi_{0,i}+\psi_{2,i}k_{def}) =$		3,68	[mm]	(konzervativně)
limitní hodnota konečn. průhybu	$w_{fin,net,lim} = L/150 =$	19,67	[mm]	
využití	$\varrho =$	18,71	[%]	Vyhovuje

8.4 Průběžné prvky trojúhelníkových segmentů

Rozhodující je pro průběžné prvky trojúhelníkových segmentů svislá deformace mezi krajními oblouky. Deformace prutu je zobrazena na obrázku 66:



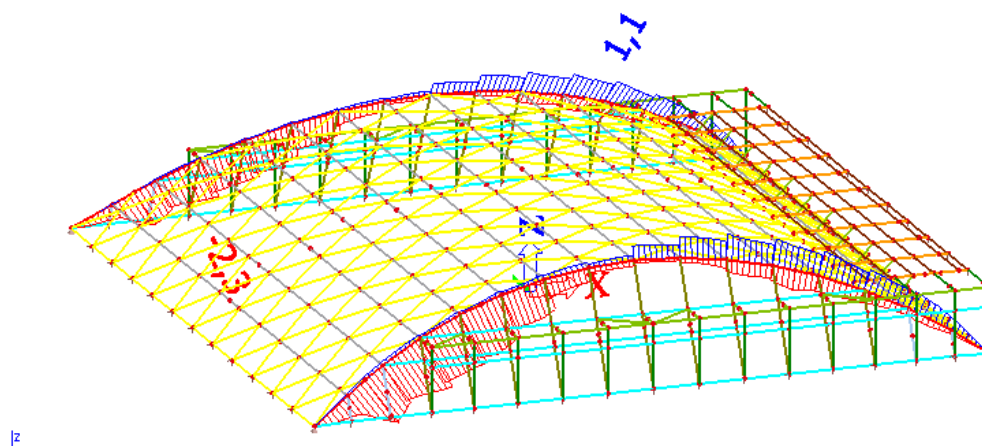
Obr. 66: Deformace průběžných prvků trojúhelníkových segmentů.

Nejkritičtější hodnoty vypočtené na základě vzorců (21), (22) a (24) jsou:

okamžitý průhyb	$w_{inst,char} =$	77,00	[mm]	
délka rozpětí	$L =$	36500	[mm]	
limitní hodnota okamž. průhybu	$w_{lim} = L/300 =$	121,67	[mm]	
využití	$\varrho =$	63,29	[%]	Vyhovuje
konečný průhyb po dotvarování:	$w_{inst,kvaz} =$	20,01	[mm]	
délka rozpětí	$L =$	36500	[mm]	
$w_{fin} = w_{inst,G}(1+k_{def}) + w_{inst,Q1}(1+\psi_{2,1}k_{def}) + w_{inst,Q,i}(\psi_{0,i}+\psi_{2,i}k_{def}) =$				32,016 [mm] (konzervativně)
limitní hodnota konečn. průhybu	$w_{fin,net,lim} = L/150 =$	243,33	[mm]	
využití	$\varrho =$	13,16	[%]	Vyhovuje

8.5 Krajiní obloukové nosníky

Krajiní nosníky vykazují malé deformace díky své geometrii, která zajišťuje namáhání převážně tlakem. Deformace prutu je zobrazena na obrázku 67:



Obr. 67: Deformace krajních obloukových nosníků při charakteristické kombinaci zatížení.

Nejkritičtější hodnoty vypočtené na základě vzorců (21), (22) a (24) jsou:

okamžitý průhyb	$w_{inst,char} =$	2,30	[mm]	
délka rozpětí	$L =$	36700	[mm]	
limitní hodnota okamž. průhybu	$w_{lim} = L/300 =$	122,33	[mm]	
využití	$\varrho =$	1,88	[%]	Vyhovuje
konečný průhyb po dotvarování:	$w_{inst,kvaz} =$	0,40	[mm]	
délka rozpětí	$L =$	36700	[mm]	
$w_{fin} = w_{inst,G}(1+k_{def}) + w_{inst,Q1}(1+\psi_{2,1}k_{def}) + w_{inst,Q,i}(\psi_{0,i}+\psi_{2,i}k_{def}) =$				
		0,64	[mm]	(konzervativně)
limitní hodnota konečn. průhybu	$w_{fin,net,lim} = L/150 =$	244,67	[mm]	
využití	$\varrho =$	0,26	[%]	Vyhovuje

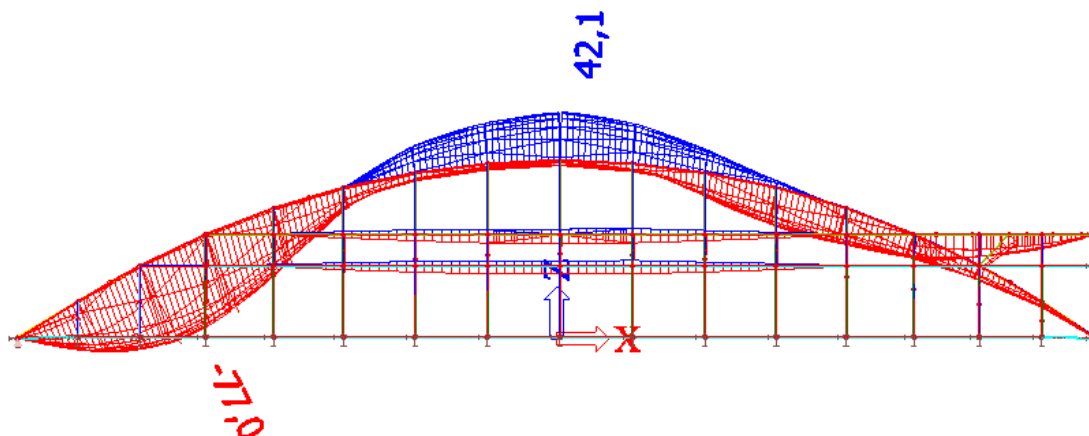
8.6 Příčné vodorovné prvky nadstavby

Chování hlavních nosníků nadstavby je určeno jednou pevnou podporou na konci a dvěma pružnými. Při charakteristické kombinaci zatížení je relativní průhyb 8,2 m. Nejkritičtější hodnoty vypočtené na základě vzorců (21), (22) a (24) jsou:

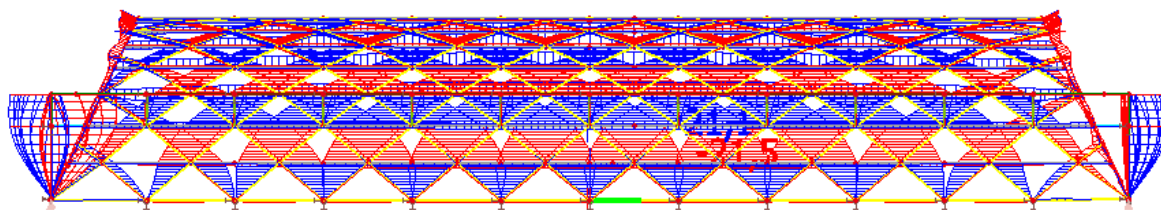
okamžitý průhyb	$w_{inst,char} =$	8,20	[mm]	
délka rozpětí	$L =$	6200	[mm]	
limitní hodnota okamž. průhybu	$w_{lim} = L/300 =$	20,67	[mm]	
využití	$\varrho =$	39,68	[%]	Vyhovuje
konečný průhyb po dotvarování:	$w_{inst,kvaz} =$	1,70	[mm]	
délka rozpětí	$L =$	6200	[mm]	
$w_{fin} = w_{inst,G}(1+k_{def}) + w_{inst,Q1}(1+\psi_{2,1}k_{def}) + w_{inst,Q,i}(\psi_{0,i}+\psi_{2,i}k_{def}) =$				
		2,72	[mm]	(konzervativně)
limitní hodnota konečn. průhybu	$w_{fin,net,lim} = L/150 =$	41,33	[mm]	
využití	$\varrho =$	6,58	[%]	Vyhovuje

8.7 Globální přetvoření konstrukce

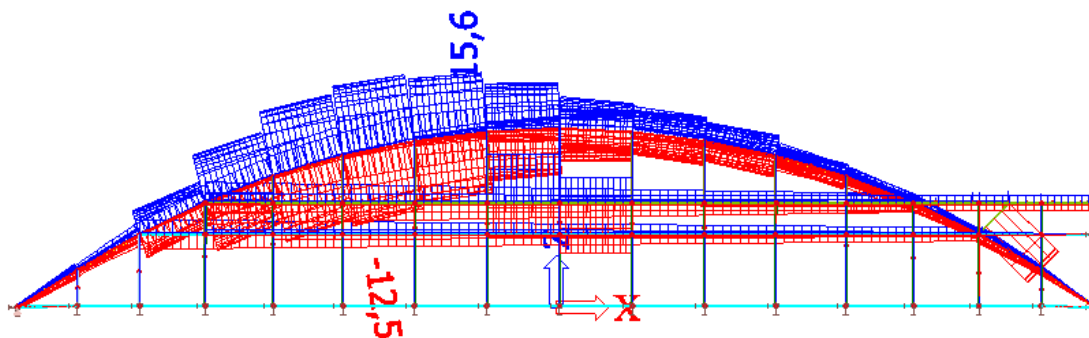
Na konstrukci jsou sledovány přetvoření nejen ve svislém směru, ale i ve směrech podélné a příčné osy objektu. Na následujících obrázcích jsou vidět přetvoření při charakteristické kombinaci zatížení ve směru jednotlivých os.



Obr. 68: Deformace konstrukce ve směru osy z.



Obr. 69: Deformace konstrukce ve směru osy y.



Obr. 70: Deformace konstrukce ve směru osy y.

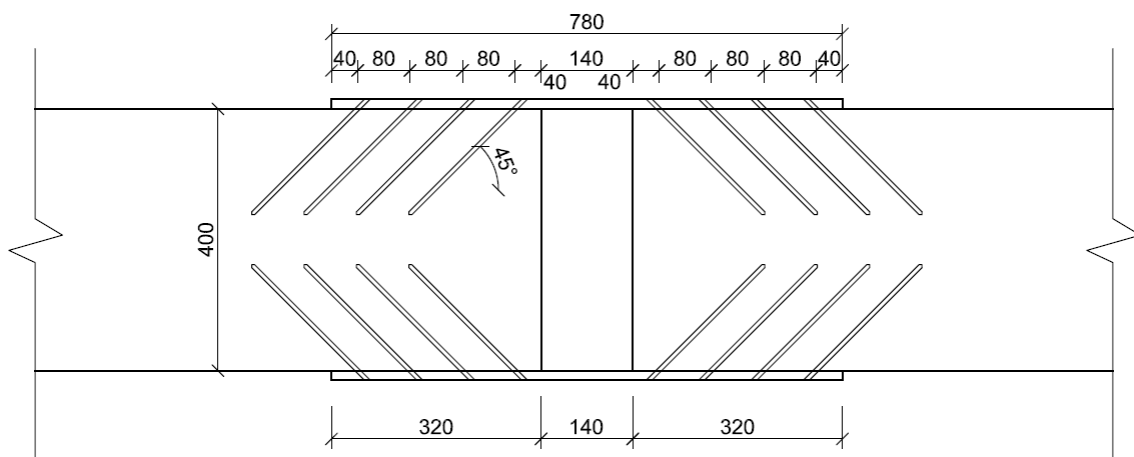
Přetvoření ve svislém směru odpovídá přibližně $1/480$ délky rozpětí při okamžité deformaci a $1/1150$ při konečné deformaci. Ve směru podélné osy y je maximální okamžité přetvoření odpovídající přibližně $1/300$ výšky konstrukce a finální přetvoření $1/1100$ výšky konstrukce. Pro směr příčné osy x je okamžité přetvoření ekvivalentní $1/500$ výšky konstrukce a finální přetvoření $1/1000$ výšky konstrukce. Všechny globální extrémní hodnoty přetvoření tedy vyhoví doporučeným mezním hodnotám se značnou rezervou.

8.8 Posouzení spojů v konstrukci

Posudek je proveden pro tři hlavní spoje kolíkového typu použité v konstrukci.

8.8.1 Styčník spojující diagonály s průběžnými prvky trojúhelníkových segmentů

Prvním řešeným spojem je styčník trojúhelníkových segmentů již zmiňovaný v kapitole 6.2. Přípoj je složen ze dvou ocelových desek, přes které jsou do diagonál navrtávány vruty SFS-WR-T 9x250. Tloušťka plechu je 12 mm. Na každé straně diagonály je 12 vrutů. Spoj je zobrazen na obrázku 53, jeho podélné schéma je možno vidět na obrázku 71.



Obr. 71: Schéma hlavního styčníku.

Styčník je zatížen normálovou silou, posouvací silou i ohybovým momentem. Přenos tlakových sil je předpokládán dotykem. Ve styčníku je posouzena únosnost jednoho vrtu, tlak kolmo k vláknům ve středovém prvku (pro ověření přenosu tlakové síly) a únosnost plechu. Návrhová síla jednoho kolíku je spočtena na základě rozdělení normálové a posouvací síly a ohybového momentu na jednotlivé kolíky. Normálová tahová síla je rozdělena na celkem 24 vrutů (na jedné straně styčníku). Moment je rozdělen na dvojici sil podle jednoduchého vzorce (25), výsledná síla je pak rozdělena do 12 vrutů.

$$F = \frac{M}{r}, \quad (25)$$

kde r je rameno sil.

Síly působící ve spoji mají hodnoty:

$$\begin{aligned} N_{Ed} &: 370,8 \quad [\text{kN}] \quad (\text{tah}) \\ V_{Ed} &: 38,8 \quad [\text{kN}] \\ M_{Ed} &: 11,33 \quad [\text{kNm}]. \end{aligned}$$

Posouzení kolíkového spojovacího prostředku

Výsledná návrhová síla na jeden vrt určené dle výše uvedených předpokladů:

$$F_{v,Ed}: 16,75 \quad [\text{kN}]$$

Únosnost jednoho vrutu na smyk je stanovena dvěma způsoby. Prvním je určení únosnosti dle technických listů výrobce a druhým je výpočet dle eurokódu. Výrobce vrutů SFS-WR-T specifikuje charakteristickou únosnost na smyk dle tabulky na obrázku 72.

Připojení ocelové desky namáhané na smyk

tabulka 5

Hloubka zapuštění:
hlava vrutu musí být
plnoplošně zapuštěna
do zahloubení v ocelové
desce

$$F_{v,Rd} = \min \left[\frac{F_{1,Rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_{M1}}, \frac{F_{2,Rk}}{\gamma_{M2}} \right]$$

$\gamma_{M1} = 1,3$ $\gamma_{M2} = 1,3$
 $\gamma_{M1} (GL) = 1,25$

hustota ρ_k [kg/m³]						350	380	410	430	450	
WR-T-9xL [mm]	250	l_{ef} [mm]	230	h_{min} [mm]	170	odolnost proti vytažení ze dřeva $F_{1,Rk}$ [kN]	18,7	20,0	21,3	22,1	22,9
	300		280		210		22,8	24,4	25,9	26,9	27,9
	350		330		240		26,9	28,7	30,5	31,7	32,9
	400		380		280		31,0	33,1	35,1	36,5	37,8
	450		430		310		35,0	37,4	39,8	41,3	42,8
	500		480		350		39,1	41,8	44,4	46,1	47,8
únosnost vrutu v tahu $F_{2,Rk}$ [kN]						25,4					

hustota ρ_k [kg/m³]						350	380	410	430	450	
WR-T-13xL [mm]	400	l_{ef} [mm]	380	h_{min} [mm]	280	odolnost proti vytažení ze dřeva $F_{1,Rk}$ [kN]	45,1	48,1	51,1	53,1	55,1
	500		480		350		56,9	60,8	64,6	67,1	69,6
	600		580		420		68,8	73,5	78,1	81,1	84,1
	700		680		490		80,6	86,1	91,5	95,1	98,6
	800		780		570		92,5	98,8	105,0	109,1	113,1
	900		880		640		104,4	111,4	118,4	123,0	127,6
	1000		980		710		116,2	124,1	131,9	137,0	142,1
únosnost vrutu v tahu $F_{2,Rk}$ [kN]						41,3					

d_p = tloušťka ocelové desky (doporučujeme ≥ 5 mm) – pokud není určeno jinak

Pozor: Nosné připoje ocel-dřevo mohou navrhovat a provádět pouze vyškolení odborníci

d_p = tloušťka ocelové desky (doporučujeme ≥ 5 mm) – pokud není určeno jinak
Pozor: Nosné připoje ocel-dřevo mohou navrhovat a provádět pouze vyškolení odborníci!

Obr. 72: Smyková únosnost dle dodavatele vrutů pro spoj ocel-dřevo.

Přepočet charakteristické hodnoty na návrhovou je proveden dle vzorce doporučeného dodavatelem:

$$F_{V,Rd} = \min \left(\frac{F_{1,Rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_{M1}}, \frac{F_{2,Rk}}{\gamma_{M2}} \right) \quad (26)$$

Výsledná hodnota únosnosti jednoho vrutu dle výrobce je tedy:

$$F_{V,Rd}: \quad \mathbf{17,57} \quad [\text{kN}]$$

Postup na určení únosnosti osově zatížených vrutů pod úhlem dle eurokódu se řídí vzorci:

$$F_{ax,a,Rk} = n_{ef} (\pi d l_{ef})^{0,8} f_{ax,a,k},$$

kde char. pevnost na vytažení je:

$$f_{ax,a,k} = \frac{f_{ax,k}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cos^2 \alpha'}$$

a charakteristická pevnost na vytažení kolmo k vláknům je: (27)

$$f_{ax,k} = 3,6 \cdot 10^{-3} \rho_k^{1,5},$$

přičemž ρ_k je charakteristická hustota dřeva, l_{ef} je délka vniku hrotu závitu zmenšená o jeden průměr vrutu, d je vnější průměr měřený na závitové části a n_{ef} je účinný počet vrutů.

Vypočtené hodnoty dle postupu eurokódu jsou:

průměr závitu	d:	9	[mm]
úhel vrutu	α :	45	[°]
počet vrutů	n:	1	[-]
délka vniku hrotu zmenšená o jeden průměr	l_{ef} :	241	[mm]
char. pevnost na vytaž.	$f_{ax,k}$:	26,67	[MPa]
	$f_{ax,\alpha,k}$:	21,33	[MPa]
únosnost na vytažení	$F_{ax,\alpha,Rd}$:	18,92	[kN]

Výsledná míra namáhání vrutu dle dodavatele a eurokódu je:

využití vrutu dle dodavatele: \mathcal{G} : 95,3 [%] Vyhovuje

využití vrutu dle eurokódu: \mathcal{G} : 88,5 [%] Vyhovuje

Posouzení tlaku kolmo k vláknům na středním prvku

Přenesení tlakové síly o velikosti $N_{Ed} = -398,85$ kN je předpokládáno lípnutím diagonálního a průběžného prvku. Posouzení je provedeno dle kapitoly 6.1.5 normy [4]. Napětí při tlaku kolmo k vláknům musí vyhovět podmínce (28).

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, \quad (28)$$

kde $\sigma_{c,\alpha,d}$ je napětí pod úhlem α a $k_{c,90}$ je součinitel zohledňující napětí kolmo k vláknům.

Pro určení součinitele $k_{c,90}$ při daném namáhání platí článek (4), udávající vztah (29):

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l}{250}\right) \left(\frac{l_{ef}}{l}\right)^{0,5}, \quad (29)$$

kde l je dotyková délka.

Efektivní délka pro prvky na lokálních podporách je dána vzorcem:

$$l_{ef} = 0,5 \left(l + l_s \frac{2h}{3}\right), \quad (30)$$

Jednotlivé mezikroky výpočtu, výsledná návrhová pevnost a využití průřezu jsou:

návrh. zatížení v tlaku \perp k vláknům	$F_{c,90,d}$:	398,00	[kN]	
úhel, pod kterým napětí působí	α :	59	[°]	
	h :	163,00	[mm]	
	b :	400,00	[mm]	
úč. dotyková pl. v tlaku \perp k vláknům	A_{ef} :	65200,0	[mm ²]	
napětí působící pod úhlem	$\sigma_{c,\alpha,d}$:	6,10	[MPa]	
dotyková délka	l :	163,00	[mm]	
efektivní délka:	l_{ef} :	583,33	[mm]	
souč. zohled. uspořádání zat.	$k_{c,90}$:	3,27	[-]	
návrhová tlak. pevn. \parallel k vláknům	$f_{c,0,d}$:	17,28	[MPa]	
návrhová tlak. pevn. \perp k vláknům	$f_{c,90,d}$:	1,94	[MPa]	
návrh. pevnost (Hankinsonův vztah)	$f_{c,\alpha,d}$:	6,88	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	88,77	[%]	Vyhovuje

Posouzení ocelového plechu

Ocelový plech je posouzen na únosnost v tahu, smykovou únosnost (od posouvací síly) a víceosou napjatost. Na plech působí normálová tahová síla ve dvou směrech a smyková síla na rozhraní dřevěných prvků. Tloušťka plechu je uvažována 12 mm.

Posouzení únosnosti plechu v prostém tahu je provedeno dle vzorců (31) z normy pro posuzování ocelových konstrukcí [3].

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}},$$

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (31)$$

kde A_{net} je oslabená plocha o otvory v průřezu a f_y mez kluzu oceli.

Hodnoty pro posouzení únosnosti plechu na tah a míra využití plechu:

$$N_{t,Ed} = 370,8 \quad [\text{kN}]$$

$$\text{plocha } A = 1200,00 \quad [\text{mm}^2]$$

$$A_{net} = 960 \quad [\text{mm}^2]$$

Prostý tah:

$$N_{t,Rd} = 426,00 \quad [\text{kN}]$$

$$\text{využití } N_{t,Ed} / N_{t,Rd} = \mathbf{87,04} \quad [\%] \quad \mathbf{Vyhovuje}$$

Tah na prvku s otvory:

$$N_{net,Rd} = 489,60 \quad [\text{kN}]$$

$$\text{využití } N_{net,Ed} / N_{net,Rd} = \mathbf{68,16} \quad [\%] \quad \mathbf{Vyhovuje}$$

Posouzení na smyk se řídí vzorcem:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{vz} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}, \quad (32)$$

kde A_{vz} je smyková plocha.

Výpočet s mezikroky, výslednou únosností a využití:

$$\begin{aligned} V_{Ed} &= 38,4 \quad [\text{kN}] \\ \text{smyk. plocha } A_{vz} &= 1200 \quad [\text{mm}^2] \\ V_{pl,Rd} &= 245,95 \quad [\text{kN}] \\ \text{využití } V_{Ed} / V_{pl,Rd} &= \mathbf{15,61 \quad [\%] \quad \text{Vyhovuje}} \end{aligned}$$

Ve střední oblasti styčnicku je víceosá napjatost způsobená dvojicí tahových sil a smykovou silou. Posouzení je provedeno dle podmínky:

$$1 \geq \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{y,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2, \quad (33)$$

kde $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{y,Ed}$ a $\tau_{x,Ed}$ jsou příslušné napětí.

Po dosazení do pravé strany nerovnice (33) vychází:

$$0,758 + 0,758 - 0,758 + 0,073 = 0,831$$

využití: ρ : **83,1** [%] **Vyhovuje**

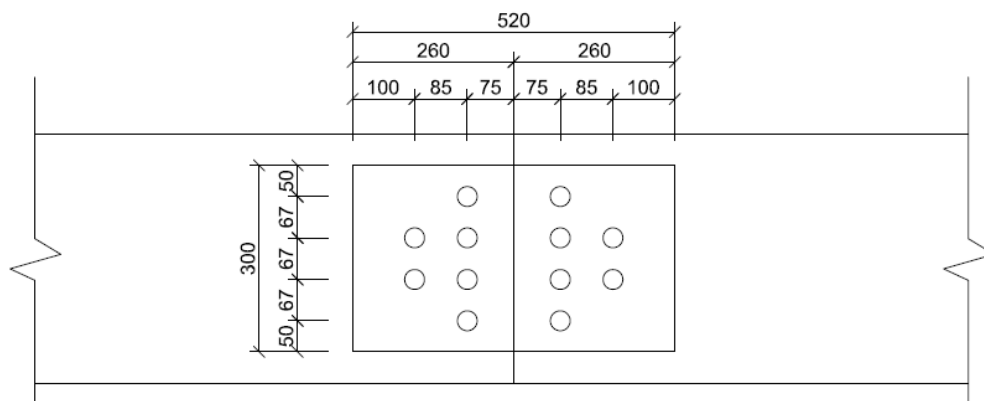
8.8.2 Posouzení montážního spoje průběžných prvků

Průběžné prvky trojúhelníkových segmentů probíhají přes celou délku stavby, jejich celková délka je tedy cca 36,5 m. Z výrobních a přepravních důvodů je nutno tyto prvky na stavbě spojovat z menších dílů. Montážní spoj je navržen na nejkritičtější působící vnitřní síly. Spoj je svorníkový s vloženou svislou ocelovou deskou uprostřed prvku, lze jej shlédnout na obrázku 73.



Obr. 73: Realizovaný montážní spoj průběžných prvků.

Na spoji se nachází celkem 6 svorníků průměru 22 mm, v první řadě 4 a v druhé řadě 2. Schéma spoje s rozvržením svorníků je na obrázku 74.



Obr. 74: Schéma svorníkového spoje.

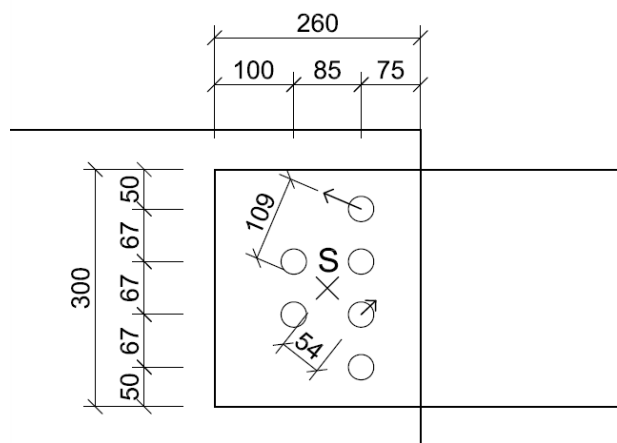
Tlakové síly se dle obdobného předpokladu jako v předešlém spoji přenesou dotykem prvků, vnitřní síly působící na styčnick jsou:

$$N_{Ed} : 124,83 \quad [\text{kN}]$$

$$V_{Ed} : 33,11 \quad [\text{kN}]$$

$$M_{Ed} : 37,53 \quad [\text{kNm}]$$

Nejvíce namáhané svorníky jsou ty s největším ramenem síly od středu otáčení. Normálová a posouvací síly jsou do každého svorníku rozloženy rovnoměrně (předpoklad pružného působení). Ohybový moment je rozdělen do jednotlivých svorníků v závislosti na velikosti jejich ramena od středu otáčení. Okótované schéma spoje s naznačenými silami lze vidět na obrázku 75.



Obr. 75: Schéma spoje s působícími silami.

Vzorec použitý pro rozdělení ohybového momentu na nejvíce zatížený svorník:

$$F_M = \frac{M_d r_1}{n_1 r_1^2 + n_2 r_2^2}, \quad (34)$$

kde r_i jsou vzdálenosti svorníků od středu otáčení.

Ze síly F_M je dále spočtena její vodorovná a svislá složka na základě vztahů:

$$\begin{aligned} F_{M,hor} &= F_M \cos \alpha, \\ F_{M,ver} &= F_M \sin \alpha, \end{aligned} \quad (35)$$

K těmto silám je dále připočtena složka normálové a posouvací síly. Výsledná maximální síla F_{result} je dána vektorovým součtem horizontální a vertikální síly:

$F_M :$	9,43	[kN]
$\alpha_{F,M} :$	23	[°]
$F_{M,hor} :$	8,68	[kN]
$F_{M,ver} :$	3,68	[kN]
$F_{N,hor} :$	20,81	[kN]
$F_{V,ver} :$	5,52	[kN]
$F_{hor} :$	29,48	[kN]
$F_{ver} :$	9,20	[kN]
$F_{result,d} :$	30,88	[kN]

Stanovení únosnosti kolíku je provedeno dle kapitoly 8.5 normy [4]. Po určení charakteristické hodnoty plastického momentu únosnosti $M_{y,Rk}$ jsou stanoveny charakteristické pevnosti v otlacení dřeva a ocelové desky. Následně je na základě Johansenových vztahů (36) (pro ocelovou desku jako střední prvek dvojstřížného spoje) určena únosnost jednoho dvoustřížného svorníku.

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (f) \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (g) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (h) \end{cases} \quad (36)$$




Stručný postup výpočtu únosnosti kolíku:

bezp. souč.	$\gamma_M :$	1,3	[-]
průměr spoj. prostředku	d:	22	[mm]
pevnost drátu v tahu	$f_u :$	800	[MPa]
char. pevnost dřeva	$\rho_k :$	380	[kg/m ³]

char. hodn. plast. mom. únos. $M_{y,Rk}$: 742,18 [MNm]

tloušťka dřeva	t_1 :	45	[mm]
úhel spoj. prostředku	α :	0	[°]
tloušťka oc. desky	t_2 :	12	[mm]
pevnost v otláčení dřeva	$f_{h,k,2}$:	24,30	[MPa]
	k_{90} :	1,68	[-]
pevnost v otláčení desky	$f_{h,0,k}$:	24,30	[MPa]
	$f_{h,\alpha,k}$:	24,30	[MPa]
přírutek od sepnutí	$F_{ax,Rk}/4$:	0	[kN]

Porušení dle Johansenových vztahů pro jednotlivé typy porušení relevantní k použité střední ocelové desce:

$F_{v,Rd}$:	(f)	48,1	[kN]	→	
$F_{v,Rd}$:	(g)	56,7	[kN]	↘	
$F_{v,Rd}$:	(h)	91,6	[kN]	↗	

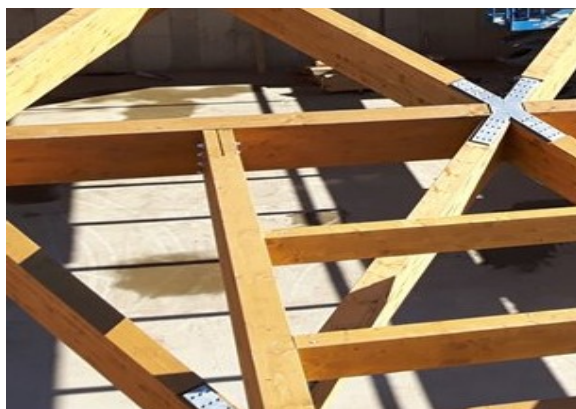
Návrhová únosnost svorníku je potom:

Únosn. řady spojů $F_{v,ef,Rd}$: **37,02** [kN]
 využití svorníku: η : **83,4** [%] **Vyhovuje**

Pro úplné ověření spoje je dále posouzena únosnost ocelového plechu, výpočet zde není uveden z důvodu zestručnění práce.

8.8.3 Posouzení spojů konstrukcí nadstavby a přístavku

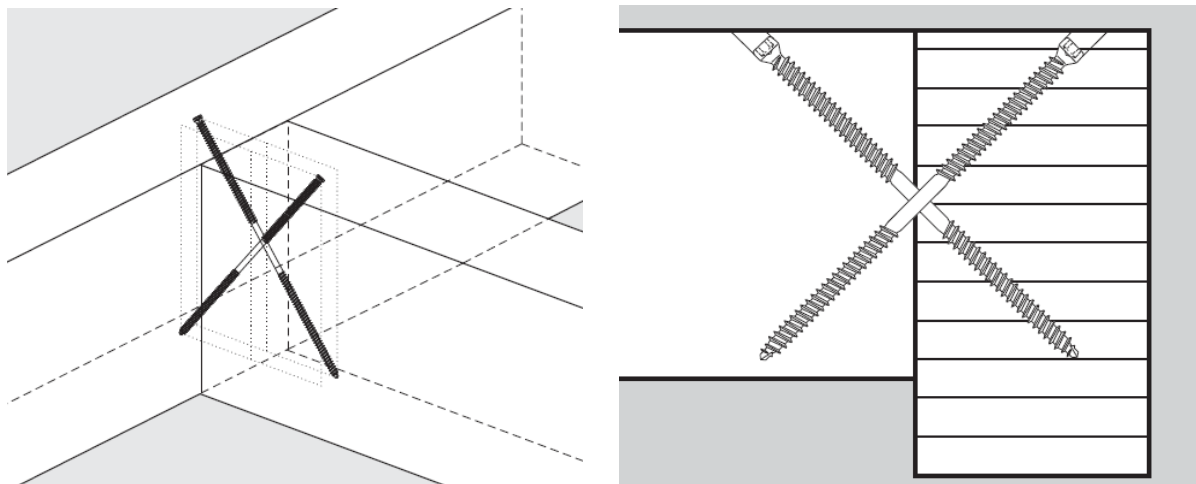
Styčníky prvků v nadstavbě a bočních přístavcích (obr. 76) jsou řešeny skrytými vruty 2 x WT-T-6,5 x 160 vrtanými pod úhlem 45°. Dvojice kolíků jsou vrtány pro každý spoj ve dvou řadách.



Obr. 76: Realizované připojení vedlejšího nosníku na hlavní nosník v konstrukci nadstavby.

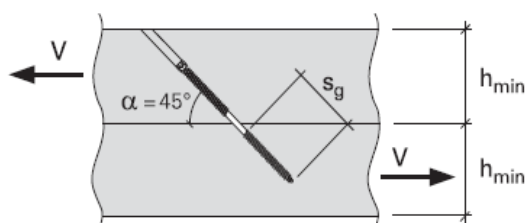
Posouzení je provedeno na základě porovnání namáhání s únosností deklarovanou výrobcem. Způsob stykování hlavního a vedlejšího nosníku je zobrazen na obrázku 77. Prvky působí jako prosté nosníky, návrhová vnitřní posouvací síla na spoj:

$$V_{Ed} : \quad \mathbf{4,78} \quad [\text{kN}]$$



Obr. 77: Způsob spojování hlavního a vedlejšího prvku pomocí vrutů WT.

Smykové spojení, polovina délky závitu v obou konstrukčních prvcích tabulka 3



Upozornění: při jednostranném šikmém osazení mohou být převzaty síly pouze **z jednoho** směru (viz obrázek).

$$R_{V,d} = \frac{R_{V,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$\gamma_M = 1,3$$

hustota ρ_k [kg/m ³]						350	380
WT-S/T-6,5 xL [mm]	65	s_g [mm]	28	h_{min} [mm]	25	1,42	1,67
	90		40		35	2,03	2,39
	130		55		50	2,79	3,29
WT-T-6,5 xL [mm]	160	s_g [mm]	65	h_{min} [mm]	60	3,29	3,88
	190		80		70	4,05	4,78
	220		95		80	4,81	5,67

hustota ρ_k [kg/m ³]						350	380
WT-T-8,2 x L [mm]	160	s_g [mm]	65	h_{min} [mm]	60	4,16	4,90
	190		80		70	5,11	6,03
	220		95		80	6,07	7,16
	245		107		90	6,84	8,06
	275		122		100	7,80	9,19
	300		135		110	8,63	10,17
	330		135		120	8,63	10,17

Obr. 78: Technický list vrutů namáhaných smykovou silou.

Využití jednoho vrutu je dáno vztahy:

$$\vartheta = \frac{V_{Ed}}{2R_{V,d}}, \quad (37)$$

kde V_{Ed} je návrhová posouvací síla a $R_{V,d}$ je návrhová únosnost kolíku vypočtená dle vzorce na obrázku 78.

$V_{Ed} :$	4,78	[kN]
$R_{V,d} :$	2,69	[kN]
využití $\vartheta :$	89,0	[%] Vyhovuje

8.9 Posouzení požární odolnosti vybraných nosných prvků

Posouzeny jsou dva nosné prvky konstrukce. Posouzení je provedeno metodou redukovaného průřezu. Výpočet je proveden pro jednu nejkritičtější kombinaci zatížení. Oba průřezy jsou posouzeny na požární odolnost R30. Prvky mají na svém horním líci záklopy z dřevěných fošen, které brání působení přímého požáru na horní plochy trámů.

8.9.1 Postup posouzení

Pro ověření požární odolnosti dřevěných konstrukcí je dle normy ČSN EN 1995-1-2 [5] používáno dílčích součinitelů a principů mezních stavů [9]. U metody redukovaného průřezu se určuje hloubka zuhelnatění průřezu, o kterou je redukován původní průřez.

Vnitřní síly pro mimořádnou návrhovou situaci (požár) lze zjednodušeně stanovit ze vztahu:

$$X_{Ed,fi} = X_{Ed}\eta_{fi},$$

kde $X_{Ed,fi}$ je návrhová vnitřní síla pro mimořádnou situaci a η_{fi} je redukční součinitel pro návrhové zatížení při požáru. (38)

Hodnota redukčního součinitele η_{fi} může být zjednodušeně 0,6. Podrobněji je součinitel určen vzorcem:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k,1}},$$

kde G_k je charakteristická hodnota stálého zatížení, $Q_{k,1}$ je charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení, γ_G a γ_Q jsou dílčí součinitelé zatížení a ψ_{fi} je součinitel pro časté hodnoty proměnných zatížení při požární situaci. (39)

Určení účinné hloubky zuhelnatění se řídí vztahem:

$$\begin{aligned}d_{ef} &= d_{char,n} + k_0 d_0, \\d_{char,n} &= \beta_n t,\end{aligned}\tag{40}$$

kde β_n je nominální rychlost zuhelnatění, t je čas vystavení průřezu účinkům požáru, k_0 je součinitel a d_0 je hloubka zuhelnatění 7 mm.

Účinný průřez prvku s chráněným horním lícem je potom původním průřezem redukováným o účinnou hloubku zuhelnatění:

$$\begin{aligned}b_{fi} &= b - 2d_{ef}, \\h_{fi} &= h - d_{ef},\end{aligned}\tag{41}$$

kde b_{fi} a h_{fi} jsou účinné rozměry obdélníkového průřezu.

Průřezové charakteristiky účinného průřezu jsou počítány již zmiňovanými vzorci (8).

Návrhové hodnoty pevnostních charakteristik jsou určeny vztahy:

$$f_{fi,d} = k_{mod,fi} k_{fi} \frac{f_k}{\gamma_{M,fi}},$$

kde $f_{fi,d}$ je návrhová hodnota pevnosti za požáru, f_k je běžná hodnota charakteristické pevnosti $\gamma_{M,fi}$ je dílčí součinitel spolehlivosti při požáru a $k_{mod,fi}$ je dán vzorcem:

$$\begin{aligned}k_{mod,fi} &= 1 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r} \text{ (pro pevnost v ohybu),} \\k_{mod,fi} &= 1 - \frac{1}{125} \frac{p}{A_r} \text{ (pro pevnost v tlaku),} \\k_{mod,fi} &= 1 - \frac{1}{330} \frac{p}{A_r} \text{ (pro pevnost v tahu),}\end{aligned}\tag{42}$$

kde p je obvod zbytkového průřezu a A_r je jeho plocha.

Po výpočtu návrhových vnitřních sil při požáru, průřezových charakteristik zbytkového průřezu a pevnostních charakteristik platných při požáru je možno dále přistoupit k posouzení prvků v mimořádné návrhové situaci.

8.9.2 Průběžné vaznice trojúhelníkových segmentů

Prvek má průřez 100/400 mm. Kritické je namáhání ohybem v kombinaci s tlakovou silou. Kombinace vnitřních sil způsobujících maximální využití za běžného provozu:

návrh. norm. síla. při běžném provozu	N_{Ed} :	4,28	[kN]
návrh. pos. síla. při běžném provozu	V_{Ed} :	16,5	[kN]
návrh. ohyb. mom. při běžném provozu	M_{Ed} :	37,53	[kNm]

Vnitřní síly v mimořádné návrhové situaci:

poměrné stálé zatížení	$G_{k,pom}$	0,4	[-]
poměrné hlavní prom. zatížení	$Q_{k,1,pom}$	0,6	[-]
	γ_g	1,35	[-]
	$\gamma_{Q,1}$	1,5	[-]
	ψ_{fi}	0,5	[-]
redukční souč. pro návrh. zat. při požáru	η_{fi}	0,49	[-]
korekce součinitele	η_{fi}	0,55	[-]
návrh. norm. síla. při požáru	$N_{Ed,fi}$	2,35	[kN]
návrh. pos. síla. při požáru	$V_{Ed,fi}$	9,08	[kN]
návrh. ohyb. mom. při požáru	$M_{Ed,fi}$	20,64	[kNm]
	N_{Ed}	2,35	[kN]
	$V_{Ed,y}$	9,08	[kN]
	$V_{Ed,z}$	0,00	[kN]
	$M_{Ed,y}$	20,64	[kNm]
	$M_{Ed,z}$	0,00	[kNm]
	T_{Ed}	0,00	[kNm]

Výpočet zbývajících efektivního průřezu za mimořádné situace:

	d_0	7	[mm]
	k_0	1	[-] (tab. 4.1)
	β_n	0,7	[-] (tab. 3.1)
	t	30	[min]
účinná hloubka zuhelnatění:	d_{ef}	28	[mm]
efektivní šířka průřezu	b_{fi}	44	[mm]
efektivní výška průřezu	h_{fi}	372	[mm]

Průřezové charakteristiky efektivního průřezu:

	plocha průř. A:	16368	[mm ²]
	obvod zbytkového průřezu p:	832	[mm]
	mom. setrvač. I_y :	1,89E+08	[mm ⁴]
	mom. setrvač. I_z :	2,64E+06	[mm ⁴]
	modul průř. W_y :	1,01E+06	[mm ³]
	modul průř. W_z :	120032,0	[mm ³]
	stat. mom. ke středu průř. S_y :	761112,0	[mm ³]
	stat. mom. ke středu průř. S_z :	90024,0	[mm ³]

polom. setrvač. i_y : 107,4 [mm]

polom. setrvač. i_z : 12,7 [mm]

Změna materiálových charakteristik dle vzorce :

modif. souč. pro ohyb za požáru $k_{mod,fi,m}$: 1,00 [-]
modif. souč. pro tah za požáru $k_{mod,fi,t}$: 1,00 [-]
modif. souč. pro tlak za požáru $k_{mod,fi,c}$: 1,00 [-]
 k_{fi} : 1,15 [-] (pro LLD)
 $\gamma_{M,fi}$: 1,00 [-]

Pevnostní vlastnosti materiálu za běžného provozu a při mimořádné situaci:

Pevn. vlastn. za běžn. provozu:			Pevn. vlastn. za požáru:		
$f_{m,d}$	19,008	[MPa]	$f_{m,d}$	20,840	[MPa]
$f_{t,0,d}$	13,068	[MPa]	$f_{t,0,d}$	15,022	[MPa]
$f_{t,90,d}$	0,360	[MPa]	$f_{t,90,d}$	0,455	[MPa]
$f_{c,0,d}$	17,280	[MPa]	$f_{c,0,d}$	19,869	[MPa]
$f_{c,90,d}$	1,944	[MPa]	$f_{c,90,d}$	2,235	[MPa]
$f_{v,d}$	2,520	[MPa]	$f_{v,d}$	2,898	[MPa]

Posouzení prvků dle vztahů uvedených v kapitolách 4, 5 a 6:

Únosnost v tahu rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.2):

tahové \parallel napětí $\sigma_{t,0,d,fi}$: 0,14 [MPa]
návrhová pevn. $f_{t,0,d,fi}$: 15,02 [MPa]
využití průřezu ρ : **0,96** [%] **Vyhovuje**

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y b_y : 44 [mm]
šířka průřezu prvku z-z b_z : 372 [mm]
souč. zohledňující výsušné trhliny k_{cr} : 0,67 [-]
účinná šířka průřezu $b_{eff,y,fi}$: 29 [mm]
účinná šířka průřezu $b_{eff,z,fi}$: 249 [mm]
smykové napětí ve směru y,y $\tau_{d,y,fi}$: 1,24 [MPa]
smykové napětí ve směru z-z $\tau_{d,z,fi}$: 0,00 [MPa]
návrh. pevnost ve smyku $f_{v,d,fi}$: 2,90 [MPa]
využití průřezu (směr y) ρ : **42,84** [%] **Vyhovuje**
využití průřezu (směr z) ρ : **0,00** [%] **Vyhovuje**

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y $\sigma_{m,y,d,fi}$: 20,34 [MPa]
napětí ve směru z-z $\sigma_{m,z,d,fi}$: 0,00 [MPa]

souč. redistrib. nap. a vliv nehomogenit	$k_{m,fi}$:	0,7	[-]	
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d,fi}$:	20,84	[MPa]	
$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,98	[-]	
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,68	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	\mathcal{G} :	97,60	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	\mathcal{G} :	68,32	[%]	Vyhovuje

8.9.3 Sloupy bočních stěn

Prvky jsou průřezu 140/280 mm. Pro dimenzování prvků je kritický ohyb se zároveň působícím vzpěrem. Kombinace vnitřních sil způsobujících maximální využití za běžného provozu:

návrh. norm. síla. při běžném provozu	N_{Ed} :	-94,11	[kN]
návrh. pos. síla. při běžném provozu	V_{Ed} :	11,5	[kN]
návrh. ohyb. mom. při běžném provozu	M_{Ed} :	17,09	[kNm]

Vnitřní síly v mimořádné návrhové situaci:

poměrné stálé zatížení	$G_{k,pom}$:	0,4	[-]
poměrné hlavní prom. zatížení	$Q_{k,1,pom}$:	0,6	[-]
	γ_g :	1,35	[-]
	$\gamma_{Q,1}$:	1,5	[-]
	ψ_{fi} :	0,5	[-]
redukční souč. pro návrh. zat. při požáru	η_{fi} :	0,49	[-]
korekce součinitele	η_{fi} :	0,55	[-]
návrh. norm. síla. při požáru	$N_{Ed,fi}$:	-51,76	[kN]
návrh. pos. síla. při požáru	$V_{Ed,fi}$:	6,33	[kN]
návrh. ohyb. mom. při požáru	$M_{Ed,fi}$:	9,40	[kNm]

N_{Ed} :	-51,76	[kN]
$V_{Ed,y}$:	6,33	[kN]
$V_{Ed,z}$:	0,00	[kN]
$M_{Ed,y}$:	9,40	[kNm]
$M_{Ed,z}$:	0,00	[kNm]
T_{Ed} :	0,00	[kNm]

Výpočet zbývajících efektivního průřezu za mimořádné situace:

d_0 :	7	[mm]
k_0 :	1	[-] (tab. 4.1)
β_n :	0,7	[-] (tab. 3.1)
t :	30	[min]
účinná hloubka zuhelnatění: d_{ef} :	28	[mm]
efektivní šířka průřezu b_{fi} :	84	[mm]
efektivní výška průřezu h_{fi} :	252	[mm]

Průřezové charakteristiky efektivního průřezu:

plocha průř. A :	21168	[mm ²]
obvod zbytkového průřezu p :	672	[mm]
mom. setrvač. I_y :	1,12E+08	[mm ⁴]
mom. setrvač. I_z :	1,24E+07	[mm ⁴]
modul průř. W_y :	8,89E+05	[mm ³]
modul průř. W_z :	296352,0	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_y :	666792,0	[mm ³]
stat. mom. ke středu průř. S_z :	222264,0	[mm ³]
polom. setrvač. i_y :	72,7	[mm]
polom. setrvač. i_z :	24,2	[mm]

Změna materiálových charakteristik dle vzorce (42):

modif. souč. pro ohyb za požáru $k_{mod,fi,m}$:	1,00	[-]
modif. souč. pro tah za požáru $k_{mod,fi,t}$:	1,00	[-]
modif. souč. pro tlak za požáru $k_{mod,fi,c}$:	1,00	[-]
k_{fi} :	1,15	[-] (pro LLD)
$\gamma_{M,fi}$:	1,00	[-]

Pevnostní vlastnosti materiálu za běžného provozu a při mimořádné situaci:

Pevn. vlastn. za běžn. provozu:			Pevn. vlastn. za požáru:		
$f_{m,d}$	19,008	[MPa]	$f_{m,d}$	21,669	[MPa]
$f_{t,0,d}$	13,068	[MPa]	$f_{t,0,d}$	15,024	[MPa]
$f_{t,90,d}$	0,360	[MPa]	$f_{t,90,d}$	0,455	[MPa]
$f_{c,0,d}$	17,280	[MPa]	$f_{c,0,d}$	19,870	[MPa]
$f_{c,90,d}$	1,944	[MPa]	$f_{c,90,d}$	2,235	[MPa]
$f_{v,d}$	2,520	[MPa]	$f_{v,d}$	2,898	[MPa]

Posouzení prvků dle vztahů uvedených v kapitolách 4, 5 a 6:

Únosnost v prostém tlaku rovnoběžně s vl. (EN 5 - 6.1.4):

tlakové napětí	$\sigma_{c,0,d,fi}$:	2,45	[MPa]	
návrhová pevn.	$f_{c,0,d,fi}$:	19,87	[MPa]	
využití průřezu	ρ :	12,31	[%]	Vyhovuje

Smykové namáhání (EN 5 - 6.1.7):

šířka průřezu prvku y-y	b_y :	84	[mm]	
šířka průřezu prvku z-z	b_z :	252	[mm]	
souč. zohledňující výsušné trhliny	k_{cr} :	0,67	[-]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,y,fi}$:	56	[mm]	
účinná šířka průřezu	$b_{eff,z,fi}$:	169	[mm]	
smykové napětí ve směru y,y	$\tau_{d,y,fi}$:	0,67	[MPa]	
smykové napětí ve směru z-z	$\tau_{d,z,fi}$:	0,00	[MPa]	
návrh. pevnost ve smyku	$f_{v,d,fi}$:	2,90	[MPa]	
využití průřezu (směr y)	ρ :	23,09	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (směr z)	ρ :	0,00	[%]	Vyhovuje

Ohybové namáhání ve směru y-y a z-z (EN 5 - 6.1.6):

napětí ve směru y-y	$\sigma_{m,y,d,fi}$:	10,57	[MPa]	
napětí ve směru z-z	$\sigma_{m,z,d,fi}$:	0,00	[MPa]	
souč. redistrib. nap. a vliv nehomogenit	$k_{m,fi}$:	0,7	[-]	
návrh. pevnost v ohybu	$f_{m,d,fi}$:	21,67	[MPa]	
$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,49	[-]	
$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,34	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	48,79	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	ρ :	34,15	[%]	Vyhovuje

Kombinace ohybu a osového tlaku (EN 5 - 6.2.4):

$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,50	[-]	
$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$		0,36	[-]	
využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	ρ :	50,30	[%]	Vyhovuje

využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	\mathcal{G} :	35,67	[%]	Vyhovuje
---------------------------------------	-----------------	--------------	-----	-----------------

Kombinace vzpěru a ohybu (EN 5 - 6.3.2):

štíhlost k ose y	λ_y :	38,49	[-]
štíhlost k ose z	λ_z :	115,47	[-]
pom. štíhlost prvku (směr y-y)	$\lambda_{rel,y}$:	0,64	[-]
pom. štíhlost prvku (směr z-z)	$\lambda_{rel,z}$:	1,92	[-]
souč. pro prvky splňující meze zakřiv.	β_c :	0,1	[-]
	k_y :	0,72	[-]
	k_z :	2,42	[-]
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,y}$:	0,95	[-]
souč. vzpěrnosti (y-y)	$k_{c,z}$:	0,26	[-]

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,62 \quad [-]$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z}f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,82 \quad [-]$$

využití průřezu (podmínka $k_{m,z}$)	\mathcal{G} :	61,78	[%]	Vyhovuje
využití průřezu (podmínka $k_{m,y}$)	\mathcal{G} :	82,17	[%]	Vyhovuje

8.10 Návrh způsobu montáže

Samotné montáži dřevěné konstrukce předchází vyhotovení spodní stavby. To spočívá ve výkopových pracích, založení na základových pasech z monolitického železobetonu a následnou betonáží obvodových stěn a přilehlé budovy. Již při armování musí být brán zřetel na správné osazení kotevních prvků pro budoucí dřevěnou konstrukci. Kotevní prvky jsou zhotoveny ze svařenců s ocelovými plechy a výztuhami. Ocelové svařence budou ukládány na betonovou konstrukci přes vysokopevnostní cementové lože. Šrouby spojující ocelové svařence s betonovou konstrukcí budou předem zabetonovány nebo chemicky kotveny.

Veškeré dřevěné nosné prvky uskladněné na stavbě je potřeba chránit před vlhkostí a povětrnostními podmínkami. Po zhotovení spodní stavby a přípravě kotvení je možno přistoupit k montáži ukloněných krajních oblouků. Zvedání oblouků je předpokládáno po částech, s jejich vzájemným spojováním montážními spoji. Oblouky budou montážně podepřeny nejméně na dvou místech. Jako další prvky lze montovat boční sloupky, a to od těch nejkratších (krajních). Ještě před osazením posledních (nejdelších, středových) sloupů je doporučeno začít osazovat průběžné vaznice trojúhelníkových segmentů. Každá průběžná

vaznice bude montážně podepřena stojkami, průběžné vaznice budou postupně spojovány montážními spoji.

Pro zajištění prostorové tuhosti je žádoucí již v raném stádiu výstavby osazovat diagonální prvky v blízkosti rohů půdorysného obdélníku. Po osazení ukloněných krajních oblouků, průběžných vaznic trojúhelníkových segmentů je možné dokončit montáž všech diagonálních prvků. Následně je možno přistoupit k výstavbě bočních přístavků a nadstavby na straně přiléhající budovy. Boční přístavky jsou připojovány SFS vruty na sloupy. Před jejich kompletací je nutno jednotlivé vazby montážně podepřít jak ve svislé, tak ve vodorovné rovině.

Nadstavba u přiléhající budovy je podepírána hlavními spojitými nosníky, které se v první fázi uchytí na obloukovou hlavní konstrukci, na šikmé vzpěrky a na přilehlou budovu. Na ně je možno dále pomocí vrutů uchycovat vedlejší roznášející nosníky.

Po kontrole spojů a nosných prvků je nutno co nejdříve zakrýt nosnou konstrukci střešním pláštěm s hydroizolací z důvodu ochrany konstrukce před povětrnostními vlivy.

9 Alternativní lepený spoj

Předmětem výzkumu práce je navíc použití netradičního lepeného spoje diagonál a průběžných vaznic. Spoj je tvořený ocelovým plechem s otvory, který je vlepený do zářezů v dřevěných prvcích. Lepidlem pro uvažovaný spoj je dvousložkový epoxid s komerčním názvem Xepox 40 vyráběný firmou Rotho Blaas srl. Lepidlo vyhovuje specifikaci typu I, definované v EN 301. Technické listy lepidla jsou obsaženy v přílohách práce.

Lepený spoj má větší rotační i translační tuhost než spoj klasický svorníkový. Použití lepeného spoje v řešené konstrukci tudíž obnáší změnu tuhostních charakteristik hlavních styčníků.

V současně platných normách (eurokódech) není problematika lepených spojů dřevěných konstrukcí podrobně řešena. Určité pravidla a doporučení lze nalézt v německé DIN 1052, nebo české ČSN 73 1702, ty se však týkají převážně vlepovaných tyčí.

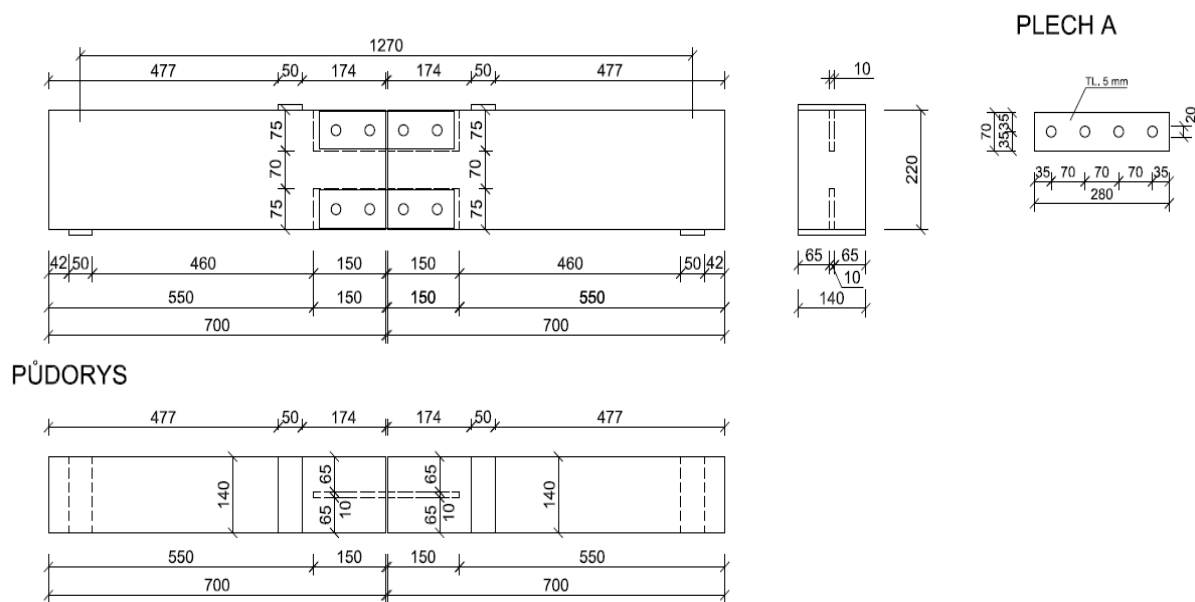
Pro spolehlivé vyšetření chování lepeného spoje byly provedeny zatěžovací zkoušky navrhovaných spojů. Analyzované byly dva druhy spojů, od každého druhu byly zatěžovány 3 vzorky.

9.1 Popis zkušebních vzorků

Vzorky byly zatěžovány čtyřbodovým ohybem. Spoj, byl umístěn uprostřed rozpětí dvojice trámů. Ocelový plech tloušťky 5 mm, byl zhotoven z konstrukční oceli třídy S235. Pro dřevěné trámy bylo použito lepeného lamelového dřeva pevnostní třídy GL24h. Trámy měly průřez 140/220 mm. Délka trámů byla 700 mm, celková délka zkušebních vzorků byla tedy 1400 mm (s nepatrnou mezerou mezi trámy).

9.1.1 Spoj s krajními ocelovými plechy (vzorky A)

První spoj tvoří dva ocelové plechy vložené do drážek u horního a spodního líce dřevěných trámů, drážky jsou zality lepidlem. Schéma ohybové zkoušky společně s rozměry dřevěných trámů a ocelového plechu jsou na obrázku 79:

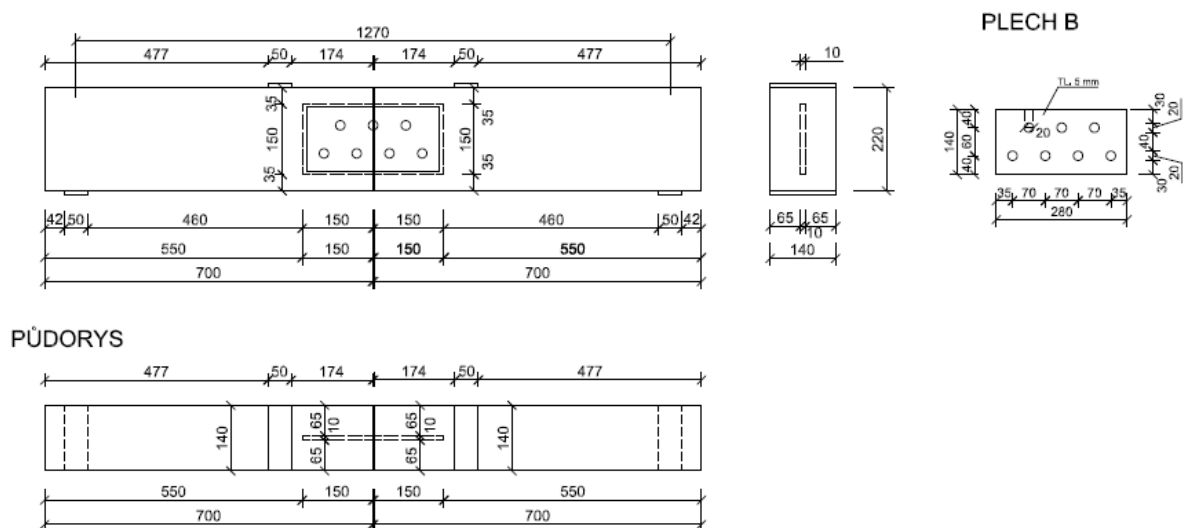


Obr. 79: Schéma vzorku A.

Rozpětí čtyřbodové ohybové zkoušky je 1270 mm, vzdálenost působících sil je 400 mm.

9.1.2 Spoj se středovým ocelovým plechem (vzorky B)

Druhým spojem je ocelový plech vložený do připravených zádlabů v trámech. Zádlaby s vloženým plechem jsou následně zality lepidlem. Schéma ohybové zkoušky společně s rozměry dřevěných trámů a ocelových plechů jsou na obrázku 80:

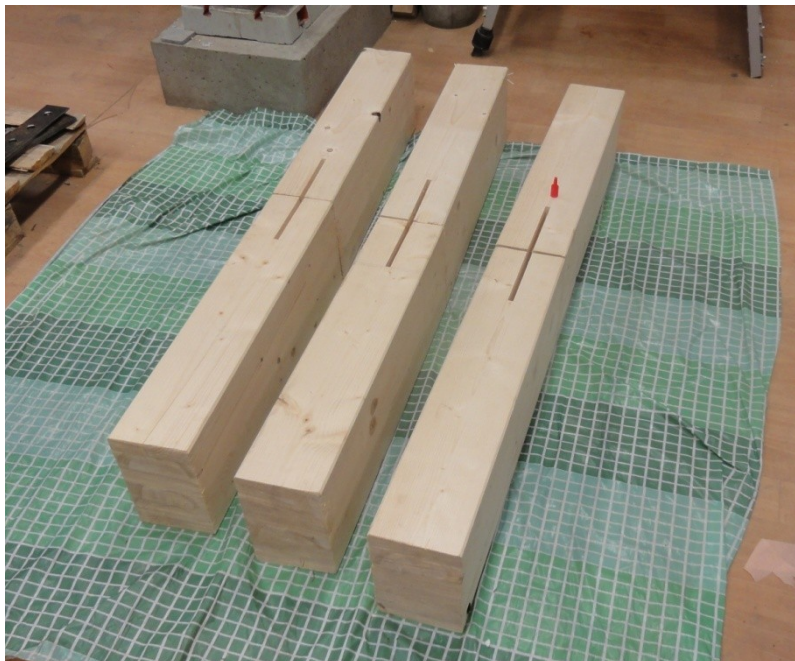


Obr. 80: Schéma vzorku B.

Rozpětí čtyřbodové ohybové zkoušky je 1270 mm, vzdálenost působících sil je 400 mm.

9.2 Postup přípravy vzorků

Pracovní postup spočíval v přípravě ocelových plechů s otvory, drážek a zádlabů do dřevěných trámů, vložení plechů do připravených kapes a zalití lepidlem. Připravené trámy byly uloženy do požadované polohy, viz obr. 81).



Obr. 81: Připravené dřevěné trámy vzorků A.

Mezera mezi trámy byla vyplněna silikonovým přípravkem z důvodu zamezení vytečení lepidla (obr. 82).



Obr. 82: Opatření proti vytečení tekutého lepidla.

Obě složky lepidla byly důkladně smíchány dle od výrobce předem připraveného poměru. Drážky ve dřevěných trámech byly zality lepidlem (obr. 83) přibližně do poloviny výšky.



Obr. 83: Zalití drážek lepidlem Xepox 40.

Do drážky zpoloviny vyplněné lepidlem byl vložen ocelový plech natřený lepidlem (obr. 84). Plechem bylo ručně zatřeseno pro dosažení vyplnění pórů ve dřevě a odstranění nežádoucího vzduchu v lepidlu. Ocelové plechy byly vycentrovány a vzorky byly ponechány v suchém laboratorním prostředí ($21 \pm 2^\circ\text{C}$, $65 \pm 5\%$ vlhkosti) k vytvrdnutí.



Obr. 84: Ocelový plech natřený lepidlem.

9.3 Výpočet únosnosti vzorků

Stanovení výpočtové síly v lisu při porušení vzorků je provedeno na základě vztahů doporučených výrobcem lepidla. Do výpočtu nejsou zahrnuty bezpečnostní součinitelé, ani vztahy upravující charakteristickou pevnost dřeva. Dle technických listů je doporučeno ověřovat zvlášť únosnost ocelového plechu, ohybové únosnosti dřeva a smykovou únosnost rozhraní mezi dřevem a lepidlem. Pro ověření dřevěného prvku při ohybu je využito klasického vztahu:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{M_E}{W_{net}}, \\ W_{net} &= \frac{(b-i)h^2}{6}, \\ \sigma_m &\leq f_{m,k},\end{aligned}\tag{43}$$

kde M_E je maximální ohybový moment, b je šířka prvku, i je šířka drážky a h je výška průřezu.

Ověření únosnosti plechu je dáno vztahy:

$$\begin{aligned}\sigma_A &= \frac{M_E}{W_A}, \\ W_A &= \frac{(t_A)h_A^2}{4}, \\ \sigma_A &\leq f_y,\end{aligned}\tag{44}$$

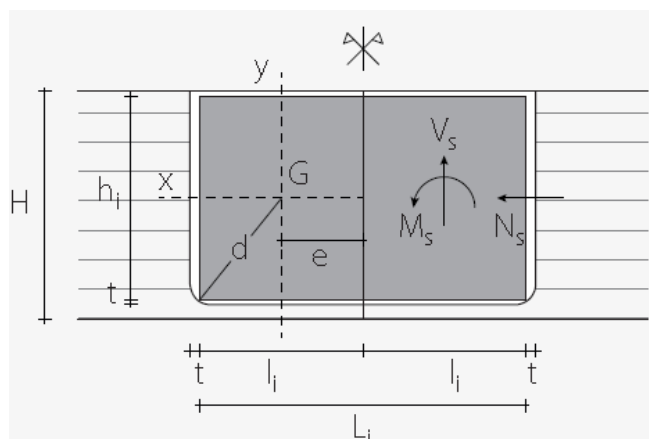
kde W_A je plastický průřezový modul, t_A je šířka plechu, a h_A je výška průřezu plechu.

Ověření únosnosti spojení se řídí vzorci:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{(M_E + M_{T,E}) \cdot d}{2I_p} + \frac{\sqrt{N_E^2 + V_E^2}}{2A_A}, \\ M_{T,E} &= V_E e, \\ I_p &= I_x + I_y = \frac{i_r h_i^3}{12} + \frac{h_i i_r^3}{12}, \\ \tau &\leq f_{v,k},\end{aligned}\tag{45}$$

kde A_A je plocha ocelového plechu, $M_{T,E}$ je přídatný moment od posouvací síly d je vzdálenost krajního bodu lepidla od středu otáčení a I_p je součet momentů setrvačnosti k ose x a y .

Jednotlivé vzdálenosti a rozměry vstupující do výpočtu jsou na obr. 85:



Obr. 85: Schéma spojení se středovým plechem.

Pro výpočet síly působící z lisu F na vzorek se středovou ocelovou deskou byly odvozeny vzorce:

$$M_E = 0,218 \cdot FL,$$

$$F = \frac{1}{1,308} \cdot f_{m,k} h^2 (b - i) \quad (\text{pro ověření únosnosti trámu}),$$

$$F = \frac{1}{1,308} \cdot t_A h^2 f_y \quad (\text{pro ověření únosnosti plechu}),$$

$$F = \frac{f_{v,k} I_p}{0,109 \sqrt{\frac{l_A^2}{4} + \frac{b_A^2}{8}}} \quad (\text{pro ověření únosnosti spojení}),$$

(46)

kde b_A a l_A jsou rozměry ocelového plechu.

Výpočet síly v lisu při porušení vzorků se středovými ocelovými deskami podle (46):

	$f_{m,g,k} =$	24	[MPa]
	$h =$	220	[mm]
	$b_{\text{bend}} =$	140	[mm]
	$i =$	10	[mm]
	$L =$	1,27	m
porušení dřeva nastává při	$F_{\text{wood}} =$	115,45	[kN]
	$h_A =$	140	[mm]
	$t_A =$	5	[mm]
	$f_y =$	235	[MPa]
porušení plechu nastává při	$F_{\text{steel}} =$	26,97	[kN]
	$f_{v,k} =$	3,5	[MPa]
	$I_x =$	3,2E+07	[mm ⁴]
	$I_y =$	3,2E+07	[mm ⁴]
	$I_p =$	6,4E+07	[mm ⁴]
	$l_A =$	280	[mm]

$$b_A = 140 \quad [\text{mm}]$$

$$d = 98,99 \quad [\text{mm}]$$

$$\text{porušení spojení nastává při } \mathbf{F_{connect} = 20,77 \quad [kN]}$$

Nejkritičtější je síla při porušení ve spojení $F_{connect} = 20,77 \text{ kN}$.

Pro výpočet síly působící z lisu F na vzorek s krajními ocelovými deskami byly odvozeny vzorce:

$$M_E = 0,218 \cdot FL,$$

$$N_E = \frac{M_E}{r},$$

$$F = \frac{1}{1,308} \cdot f_{m,k} h^2 (b - i) \quad (\text{pro ověření únosnosti trámu}), \quad (47)$$

$$F = \frac{r t_A h_A f_y}{0,218} \quad (\text{pro ověření únosnosti plechu}),$$

$$F = \frac{f_{v,k} r A_A}{0,109} \quad (\text{pro ověření únosnosti spojení}),$$

kde r je rameno pro rozdělení momentu na dvojici sil.

Výpočet síly v lisu při porušení vzorků s krajními ocelovými deskami podle (47):

$$f_{m,g,k} = 24 \quad [\text{MPa}]$$

$$h = 220 \quad [\text{mm}]$$

$$b_{\text{bend}} = 140 \quad [\text{mm}]$$

$$i = 10 \quad [\text{mm}]$$

$$L = 1,27 \quad \text{m}$$

$$\text{porušení dřeva nastává při } \mathbf{F_{wood} = 115,45 \quad [kN]}$$

$$h_A = 140 \quad [\text{mm}]$$

$$t_A = 5 \quad [\text{mm}]$$

$$f_y = 235 \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{porušení plechu nastává při } \mathbf{F_{steel} = 109,42 \quad [kN]}$$

$$f_{v,k} = 3,5 \quad [\text{MPa}]$$

$$r = 145 \quad [\text{mm}]$$

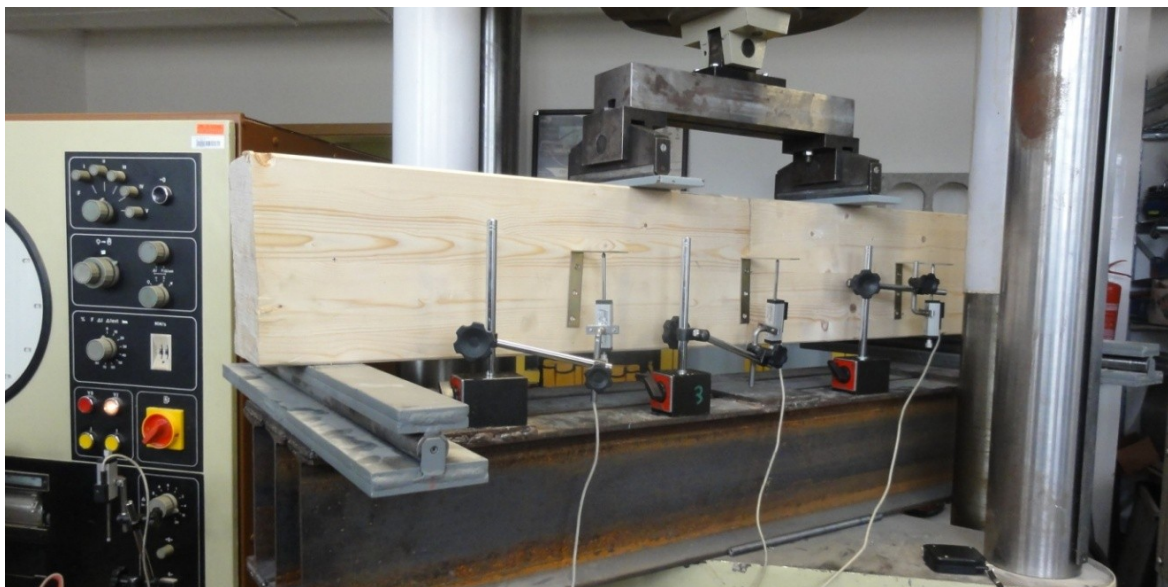
$$A_A = 9800 \quad [\text{mm}^2]$$

$$\text{porušení spojení nastává při } \mathbf{F_{connect} = 45,63 \quad [kN]}$$

Nejkritičtější je očividně síla při porušení ve spojení $F_{connect} = 45,63 \text{ kN}$.

9.4 Zatěžování vzorků

Pro zatěžování vzorků byl použit tlakový lis EU100 na Fakultě stavební, VŠB-TUO. Zatěžování probíhalo deformací, která byla rovnoměrně zvyšována rychlostí 1 mm/min. Měřeny byly v průběhu zatěžování posuny hlavy lisu a tří bodů nacházejících se uprostřed rozpětí vzorků a ve třetinách délky rozpětí. Zatěžovaný vzorek lze shlédnout na obr. 86. Zkoušky se uskutečnily v laboratorním prostředí o teplotě $20\pm 2^\circ\text{C}$ a vlhkosti $65\pm 5\%$.

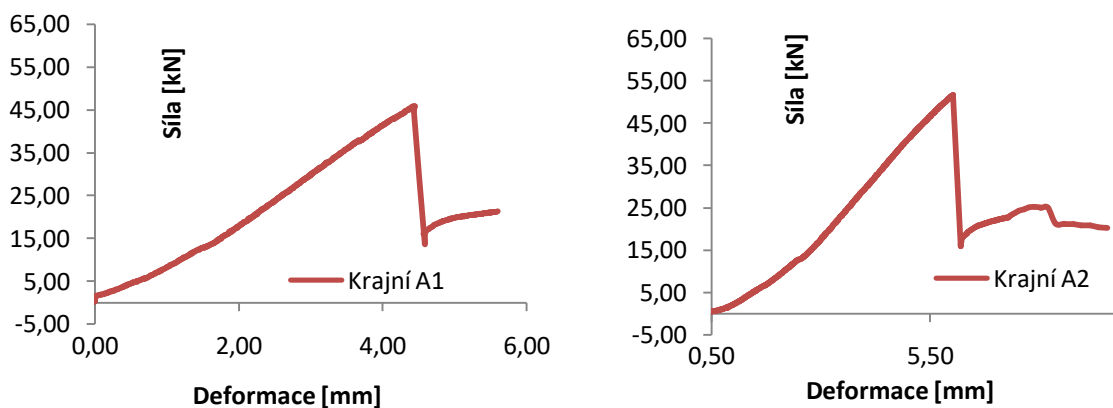


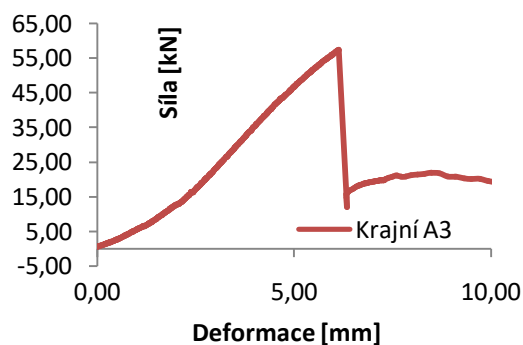
Obr. 86: Zatěžovaný vzorek.

9.4.1 Výsledky

Testované vzorky (obzvláště vzorky A) se porušily křehce náhlým odtrhnutím bloku zatvrdlého lepidla od dřevní hmoty. Maximální dosažené síly v lisu pro vzorky s plechy na krajích trámů (A) jsou 45,9; 51,6; 57,5 kN a pro vzorky se středovými plechy (B) 26,0; 26,4; 24,4 kN. Maximální relativní odchylka je u vzorků B o hodnotě 3,2 %.

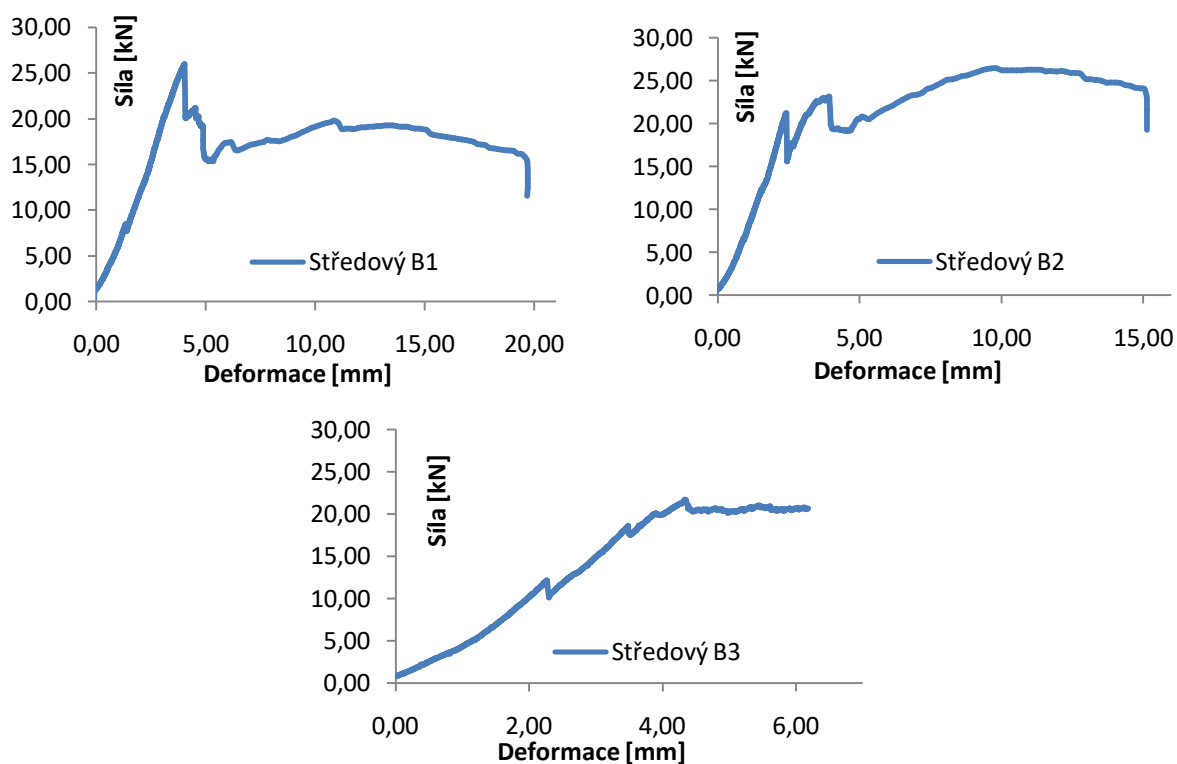
Pracovní diagramy vzorků s plechy na krajích trámů (A) jsou vidět na grafech 2 a 3:





Graf 2: Pracovní diagramy vzorků s plechy umístěnými na krajích trámů.

Pracovní diagramy vzorků se středovými plechy mají podobu:



Graf 3: Pracovní diagramy vzorků se středovými plechy.

Porušený vzorek lze shlédnout na obr. 87:



Obr. 87: Porušený vzorek vlivem odtrhnutí vrstvy dřeva.

9.5 Vyhodnocení výsledků zkoušek

9.5.1 Vzorek se středovými ocelovými plechy

Vypočtená maximální síla pro vzorky se středovým plechem je $F_{connect} = 20,77$ kN, nejvyšší dosažená hodnota při experimentu byla 26,4 kN, nejnižší 24,4 kN. Větší fyzická únosnost spoje je dána plastickou redistribucí napětí po výšce průřezu.

Předpoklad plastické redistribuce potvrzuje i průběh pracovních diagramů, které mají houževnatější chování než vzorky s krajními deskami.

9.5.2 Vzorek s krajními ocelovými plechy

Maximální vypočtená síla je $F_{connect} = 45,63$ kN. Největší dosažená síla v experimentech byla 57,5 kN, nejmenší 45,9 kN. Jelikož spoj obsahuje desky jen na krajích trámů, mají tyto vzorky menší prostor pro redistribuci napětí, což se potvrzuje v křehkém průběhu pracovních diagramů.

U spojů nelze hovořit o plné momentové únosnosti, vzorky se střední plechovou deskou se porušili při cca 23% momentové únosnosti trámu. U vzorků s krajními plechovými deskami porušení spoje nastává při cca 39% únosnosti trámu.

Je zřejmé, že výhodnější je použití spojů s krajními ocelovými plechy. Spoje jsou jednodušší na provádění, mají přibližně dvojnásobnou únosnost při stejné spotřebě materiálu a není bráněno objemovým změnám například od vysychání.

9.6 Rotační tuhost spoje

Důležitou vlastností zkoumaného spoje je nejen jeho únosnost, ale i rotační a translační tuhost. Je-li přetvoření vyvolané ohybovým momentem dostatečně malé, dá se hovořit o tuhém spoji. Tuhý spoj je v konstrukci výhodný, dokáže přenést ohybový moment a tím redistribuovat tok sil v konstrukci.

Na základě provedených zkoušek je stanovena rotační tuhost spoje podle vztahu:

$$S_{joint} = \frac{M_E}{\varphi_{joint}}, \quad (48)$$

kde S_{joint} je rotační tuhost, M_E je ohybový moment působící ve spojení, a φ_{joint} je natočení způsobené ohybovým momentem.

Vztah (48) platí jen za předpokladu lineární závislosti mezi namáháním a přetvořením. Po stanovení natočení φ_{joint} je výsledná tuhost:

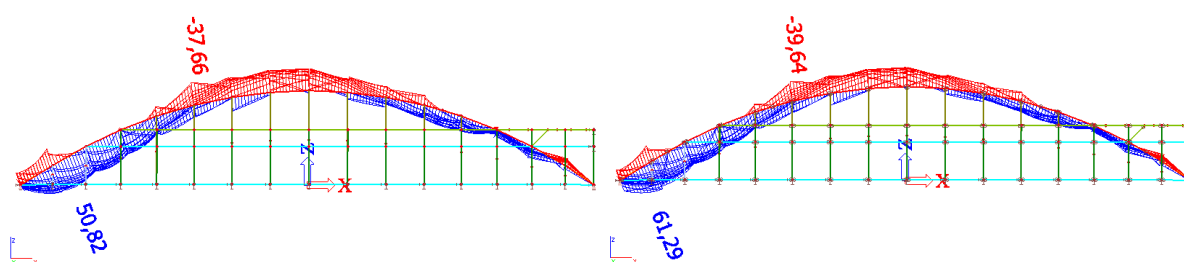
$$M_E = 9,95 \quad [\text{kNm}]$$

$w =$	5,2	[mm]
$L/2 =$	635,0	[mm]
$\sin \varphi =$	0,0082	[-]
$\varphi_{\text{joint}} =$	0,4884	[°]
$\varphi_{\text{joint}} =$	0,0085	[rad]
$S_{\text{joint}} =$	1167,01	[kNm/rad]

9.7 Aplikace řešeného spoje v navrhované konstrukci

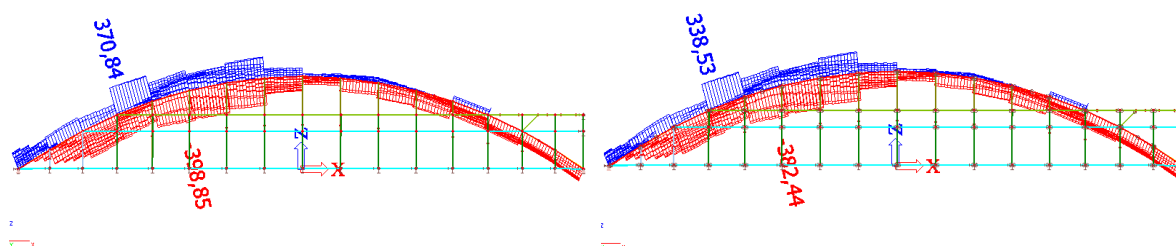
Získané charakteristiky lepeného spoje byly zavedeny do výpočetního modelu posuzované varianty. V této podkapitole je stručně popsán rozdíl chování nosných prvků konstrukce s vrutovým spojem (probíraným v kapitole 6.2) a totožné konstrukce s využitím tuhosti lepeného spoje.

Na obrázku 88 lze vidět rozdíl průběhů ohybových momentů na diagonálních prvcích trojúhelníkových segmentů.



Obr. 88: Porovnání ohybových momentů při polotuhém (vlevo) a tuhém (vpravo) spoji.

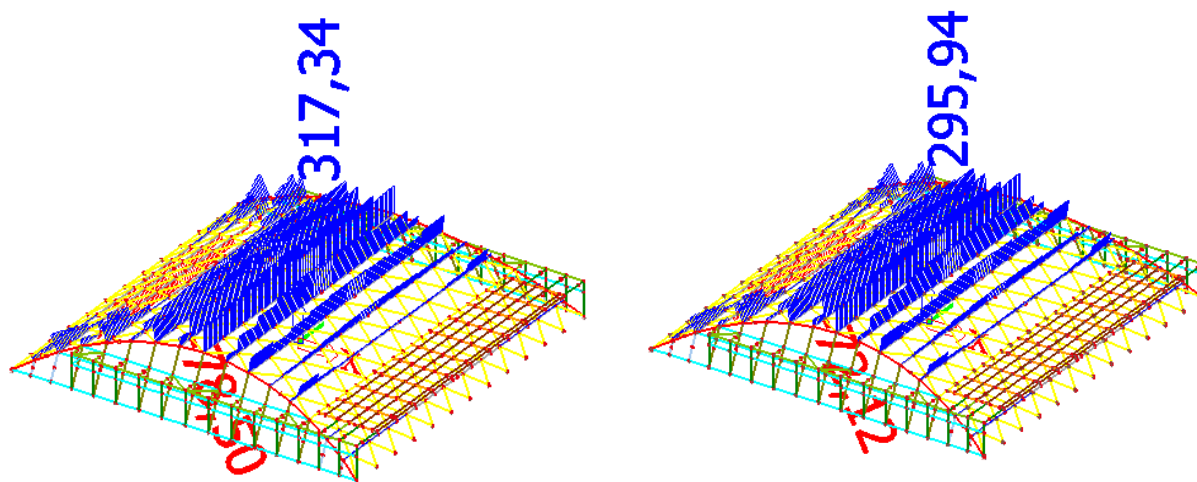
Rozdíl v normálových silách na diagonálách trojúhelníkových segmentů lze shlédnout na obr. 89:



Obr. 89: Porovnání normálových sil při polotuhém (vlevo) a tuhém (vpravo) spoji.

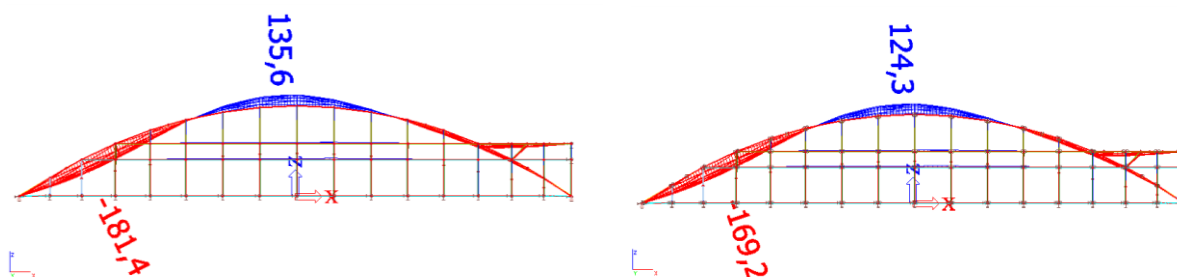
Ze srovnání je patrné, že při použití tuhého (lepeného) spoje jsou hlavní nosné prvky namáhány větším ohybem a menšími normálovými síly, než v konstrukci se spojem polotuhým (vrutovým).

Obrázek 90 nastiňuje rozdíl v normálových silách na průběžných vaznicích při využití vrutového a lepeného spoje.



Obr. 90: Porovnání normálových vaznic sil při polotuhém (vlevo) a tuhém (vpravo) spoji.

Lze vidět, že namáhání vaznic je menší u konstrukce s tuhým spojem. Celkové svislé deformace prvků jsou zobrazeny na obr. 91.



Obr. 91: Maximální svislý posun v konstrukci pro polotuhý (vlevo) a tuhý (vpravo) spoj.

Ukazuje se, že použití lepeného, tedy rotačně tužšího spoje je z hlediska namáhání konstrukce výhodnější. S aplikací zkoumaného spoje v konstrukci lze navrhnout nosné prvky hospodárněji a snížit spotřebu dřeva.

Závěr

Záměrem diplomové práce byl návrh a posouzení sportovní tenisové haly z materiálů na bázi dřeva. Navrženy byly tři varianty zastřešení: konstrukce založená na hlavních vysokých nosnících, na příhradových nosnících a konstrukce prutové prostorové klenby. Ze tří zkoumaných se jako nejvýhodnější projevila varianta prostorové klenby, již realizovaná firmou Taros – Nova s.r.o. v Košicích.

Všechny navržené prvky vyhoví na mezní stav únosnosti i na mezní stav použitelnosti. Výpočet byl proveden dle norem ČSN EN platných ke dni odevzdání práce. Důraz byl kladen na hospodárnost návrhů.

V rámci práce byly provedeny zatěžovací zkoušky netradičních spojů dřevěných konstrukcí. Výhody tohoto spoje spočívají v lepších tuhostních vlastnostech a estetice. Spoj je možno využít také při rekonstrukcích. Rotační tuhost spoje byla aplikována na navrhovanou konstrukci. Je uvedeno stručné srovnání konstrukce s vrutovým a konstrukce s lepeným spojem.

Budoucí rozvoj práce může spočívat ve 3D numerickém modelování vykonaných experimentů, provedení tahových zkoušek plechů s otvory vlepených do dřevěných zádlabů, porovnání výsledků zkoušek s již proběhlými testy lepených spojů na Fakultě stavební VŠB-TUO a podobně.

Poděkování

Mé velké díky patří doc. Ing. Antonínu Lokajovi, Ph.D., za bezmeznou ochotu a vstřícnost, Ing. Davidu Mikoláškov, Ph.D., za vynaložený čas, rady a podporu při práci, firmě Taros-Nova s.r.o za námět práce a mým blízkým za pomoc, trpělivost a pochopení ve chvílích nejtemnějších.

Normy

- [1] ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí.
- [2] ČSN EN 1991 Zatížení konstrukcí.
- [3] ČSN EN 1993 Navrhování ocelových konstrukcí.
- [4] ČSN EN 1995 Navrhování dřevěných konstrukcí.
- [5] ČSN EN 1995-1-2 Navrhování dřevěných konstrukcí na účinky požáru.

Literatura

- [6] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*. Praha : Informační centrum ČKAIT s.r.o., 2005. str. 172. ISBN 80-86769-72-0.
- [7] KUKLÍK, P., Kolektiv autorů. *Vzdělávací materiály pro navrhování a zkoušení dřevěných konstrukcí - TEMTIS*. 2008. Sv. Leonardo da Vinci Pilot Projects, 1.
- [8] Kolektiv autorů, přeložil KOŽELOUH, B. *Dřevěné konstrukce podle eurokódu - STEP 2*. Praha : Informační centrum ČKAIT, 1995.
- [9] MYNARČÍK, Petr, KLAJMONOVÁ, Kristýna, KŘIVÝ, Vít. *Požární odolnost konstrukcí, Sbírka příkladů*. Ostrava, 2014.
- [10] BREYER, D. B., FRIDLEY, K., COBEEN, K., POLLOCK D. *Design of wood structures*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2007. 6.
- [11] MIKOLÁŠEK, D., BROŽOVSKÝ, J. *Numerické modelování vybraných spojů dřevěných konstrukcí, Disetrační práce*. Ostrava : VŠB - Technická Univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavební mechaniky, 2012.

Odborné a vědecké články

- [12] VAVRUŠOVÁ, K., LOKAJ, A., MIKOLÁŠEK, D., FOJTÍK, R., ŽÍDEK, L., *Longitudinal glued joints of timber beams and the influence of quality manufacturing onto their carrying capacity*. VSB-Technical University of Ostrava, Faculty of Civil engineering Department of building structures, Department of structural mechanics, Laboratory of building materials Ostrava, Czech Republic. 2016.

- [13] ALIAMO, G., FAILLA, A., FRANCESCO, A., TESÉ, F. *The Durability of Composite Wood-Steel Systems*. Università de Palermo.
- [14] The MathWorks, Inc. *MATLAB® Creating Graphical User Interfaces* [online]. 2015. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z:
http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/buildgui.pdf
- [15] JANIŠOVÁ, I., ORSÁG, O., POVALA, M. Atletická hala v Ostravě. *Konstrukce, odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství*. 2/2016, 2016.
- [16] LINK, M., MLEJNEK, M. Titanzinková střecha zimního stadionu Ludvíka Koška v Turnově. *Konstrukce, odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství*. 4/2016, 2016.

Podklady k předmětům

- [17] *Podklady k předmětu Ocelové a dřevěné konstrukce*. LOKAJ, Antonín. Ostrava : Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, 2015.

Internetové zdroje

- [18] City park center - Košice. *Taros - Nova*. [Online] 2015. <http://www.taros-nova.cz>.
- [19] Atletická hala Ostrava Vítkovice. [Online] Taros - Nova, 2015. <http://www.taros-nova.cz/>.
- [20] Městský park, City Park Center. *kosice-foto.sk*. [Online] <http://kosice-foto.webnode.sk>.
- [21] *Scia Engineer*. [Online] Scia, a nemetschek company, 2016. <https://www.scia.net/>.
- [22] Slovenský vodoospodárny podnik i.p. Mapy povodňového ohrozenia a mapy povodňového rizika. *Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky*. [Online] 2016. <http://mpomprsr.svp.sk>.
- [23] Zimní stadion přivítal první návštěvníky. *Syner 1991 Století*. [Online] 2015. <http://www.syner.cz/>.
- [24] Building Innovative Solutions. *Barton Malow*. [Online] 2016. <http://www.bartonmalow.com>.

- [25] *Turnovsko v akci*. [Online] 2015. <http://www.turnovskovakci.cz>.
- [26] Zimní stadion dostává nový rozměr. *Turnov, oficiální stránky města*. [Online] 2015. <http://www.turnov.cz>.
- [27] Walkup Skydome. *Louie's Legacy*. [Online] 2016. <http://library.nau.edu/>.
- [28] Wikipedia. *Walkup Skydome*. [Online] 2016. https://en.wikipedia.org/wiki/Walkup_Skydome.

Seznam obrázků

Obr. 1: Atletická hala v Ostravě – pohled na střešní konstrukci [19].	15
Obr. 2: Atletická hala v Ostravě – detail kotvení vazníků [5].	15
Obr. 3: Ocelové vzpěry kruhového průřezu, zachytávající vodorovné síly zastřešení [5].	16
Obr. 4: Vizualizace zimního stadionu v Turnově [25].	16
Obr. 5: Střešní vazník [26].	17
Obr. 6: Osazování prvního vazníku [26].	17
Obr. 7: Pohled na střešní nosníky z interiéru [23].	17
Obr. 8: Stadion Walkup Skydome v Arizoně [24].	18
Obr. 9: Zastřešení stadionu [24].	19
Obr. 10: Portál dřevěné haly [24].	19
Obr. 11: Výstavba haly Walkup Skydome [24].	20
Obr. 12: Výstavba haly Walkup Skydome [24].	20
Obr. 13: Umístění tenisové haly v Košicích.	21
Obr. 14: Situace tenisového areálu [20].	22
Obr. 15: Pohled na konstrukci s viditelnou spodní stavbou tvořící podpory zastřešení.	25
Obr. 16: Přilehlá budova.	26
Obr. 17: Pohled na zastřešení s přilehlou budovou.	26
Obr. 18: Model konstrukce ŽB monolitické budovy.	26
Obr. 19: Stěna tvořící podpory pro dřevěnou konstrukci.	27
Obr. 20: Stěna namodelovaná pro určení vodorovné tuhosti podpory.	27
Obr. 21: Stěna se sloupy odolávajícími značným vodorovným silám.	28
Obr. 22: Stěna se sloupy, stanovení vodorovné tuhosti na modelu.	28
Obr. 23: Spojitý nosník podpíraný nesymetricky umístěnými sloupy.	29
Obr. 24: Model spojitěho nosníku pro určení tuhostí vazeb.	29
Obr. 25: Tvarové součinitele zatížení sněhem pro válcovou střechu.	31
Obr. 26: Tvarový součinitel pro válcové střechy dle české národní přílohy.	31
Obr. 27: Rozložení tlaků větru na stěny budovy.	34
Obr. 28: Popis rozměrů střechy a uspořádání zatížení větrem.	36
Obr. 29: Součinitele $c_{pe,10}$ pro klenbové střechy.	36
Obr. 30: Kombinace pro 2. mezní stav s charakteristickými hodnoty zatížení.	37
Obr. 31: Kombinace pro 1. mezní stav s návrhovými hodnoty zatížení.	38
Obr. 32: Kombinace zatížení pro nelineární výpočty.	38

Obr. 33: Statické schéma příhradového nosníku.....	39
Obr. 34: Osové zobrazení modelu konstrukce.	40
Obr. 35: Zobrazení modelu konstrukce s vykreslenými nosnými prvky.....	40
Obr. 36: Zatížení rovnoměrně rozloženým sněhem.	41
Obr. 37: Zatížení sněhem s uspořádáním dle české národní přílohy normy [2].	41
Obr. 38: Zatížení příčným větrem pro vnitřní tlak $c_{pi} = -0,3$	41
Obr. 39: Průběh vnitřních sil spodního pásu příhradového nosníku.	47
Obr. 40: Průběh vnitřních sil spodního pásu příhradového nosníku.	49
Obr. 41: Okamžitý průhyb konstrukce.	55
Obr. 42: Statické schéma obloukového nosníku.	56
Obr. 43: Osové zobrazení modelu konstrukce.	57
Obr. 44: Zobrazení modelu konstrukce s vykreslenými nosnými prvky.....	57
Obr. 45: Zatížení rovnoměrně rozloženým sněhem.	58
Obr. 46: Zatížení sněhem s uspořádáním dle české národní přílohy normy [2].	58
Obr. 47: Zatížení příčným větrem pro vnitřní tlak $c_{pi} = -0,3$	59
Obr. 48: Konstrukční vzpěry stabilizující hlavní nosníky.	60
Obr. 49: Okamžitý průhyb konstrukce.	72
Obr. 50: Model konstrukce s vykreslenými nosnými prvky.....	73
Obr. 51: Montáž konstrukce.....	73
Obr. 52: Pohled na opláštění dřevěné haly z interiéru.	74
Obr. 53: Styčník použitý pro spojení jednotlivých segmentů nosné konstrukce.	75
Obr. 54: Osové zobrazení modelu konstrukce.	76
Obr. 55: Zatížení rovnoměrně rozloženým sněhem.	77
Obr. 56: Zatížení sněhem s uspořádáním dle české národní přílohy normy [2].	77
Obr. 57: Zatížení příčným větrem pro vnitřní tlak $c_{pi} = -0,3$	77
Obr. 58: Zatížení podélným větrem pro vnitřní tlak $c_{pi} = +0,2$	77
Obr. 59 Průběh ohybových momentů na diagonálních prvcích.	79
Obr. 60 Průběh normálových sil na průběžných prvcích segmentů.....	83
Obr. 61 Průběh ohybových momentů k lokální ose z, na ukloněných krajních obloucích.....	87
Obr. 62 Průběh ohybových momentů na sloupech.....	91
Obr. 63 Průběh návrhových normálových sil na příčných prvcích konstrukce nadstavby.	95
Obr. 64 Průběh návrhových normálových sil na vzpěrách.	99
Obr. 65: Okamžitý průhyb konstrukce.	101
Obr. 66: Deformace průběžných prvků trojúhelníkových segmentů.	106

Obr. 67: Deformace krajních obloukových nosníků při charakt. kombinaci zatížení.....	107
Obr. 68: Deformace konstrukce ve směru osy z.	109
Obr. 69: Deformace konstrukce ve směru osy y.	109
Obr. 70: Deformace konstrukce ve směru osy y.	109
Obr. 71: Schéma hlavního styčnicku.....	110
Obr. 72: Smyková únosnost dle dodavatele vrutů pro spoj ocel-dřevo.....	111
Obr. 73: Realizovaný montážní spoj průběžných prvků.	114
Obr. 74: Schéma svorníkového spoje.	115
Obr. 75: Schéma spoje s působícími silami.	115
Obr. 76: Realizované připojení vedl. nosníku na hlavní nosník v konstrukci nadstavby.....	117
Obr. 77: Způsob spojování hlavního a vedlejšího prvku pomocí vrutů WT.	118
Obr. 78: Technický list vrutů namáhaných smykovou silou.	118
Obr. 79: Schéma vzorku A.....	129
Obr. 80: Schéma vzorku B.....	129
Obr. 81: Připravené dřevěné trámy vzorků A.	130
Obr. 82: Opatření proti vytečení tekutého lepidla.	130
Obr. 83: Zalití drážek lepidlem Xepox 40.	131
Obr. 84: Ocelový plech natřený lepidlem.	131
Obr. 85: Schéma spojení se středovým plechem.....	133
Obr. 86: Zatěžovaný vzorek.....	135
Obr. 87: Porušený vzorek vlivem odtrhnutí vrstvy dřeva.....	136
Obr. 88: Porovnání ohybových momentů při polotuhém (vlevo) a tuhém (vpravo) spoji.	138
Obr. 89: Porovnání normálových sil při polotuhém (vlevo) a tuhém (vpravo) spoji.	138
Obr. 90: Porovnání normálových vaznic sil při polotuhém (vlevo) a tuhém (vpravo) spoji. .	139
Obr. 91: Maximální svislý posun v konstrukci pro polotuhý (vlevo) a tuhý (vpravo) spoj. ..	139

Seznam tabulek

Tabulka 1: Materiálové charakteristiky dřeva GL24h.....	24
Tabulka 2: Vybrané materiálové charakteristiky oceli S355.	24
Tabulka 3: Hodnoty tvarového součinitele α_{\square} dle české národní přílohy.	32
Tabulka 4: Součinitelé vnějších tlaků c_{pe} pro stěny.	34
Tabulka 5: Výkaz dřeva ve variantě I.....	102
Tabulka 6: Výkaz dřeva ve variantě II.	102
Tabulka 7: Výkaz dřeva ve variantě III.	103

Tabulka 8: Doporučené mezní hodnoty průhybů dle [4].	105
--	-----

Seznam grafů

Graf 1: Srovnání spotřeby dřeva v jednotlivých variantách.	103
Graf 2: Pracovní diagramy vzorků s plechy umístěnými na krajích trámů.	136
Graf 3: Pracovní diagramy vzorků se středovými plechy.	136

Seznam příloh

Příloha 1: Technické listy lepidla Xepox

Příloha 2: Výkresová dokumentace:

- Výkres č. 1 – 1. NP
- Výkres č. 2 – 2. NP
- Výkres č. 3 – Konstrukční prvky
- Výkres č. 4 – Pohledy (1)
- Výkres č. 5 – Pohledy (2)
- Výkres č. 6 – Detail A (1)
- Výkres č. 7 – Detail A (2)
- Výkres č. 8 – Detail B
- Výkres č. 9 – Detail C (1)
- Výkres č. 10 – Detail C (2)
- Výkres č. 11 – Vzorky pro ohybovou zkoušku